

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulun koulutusohjelma / merenkulkualan insinööri

Jarno Männikkö

PINNANMITTAUSJÄRJESTELMIEN VIRHETEKIJÄT

Opinnäytetyö 2015

# TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulku

MÄNNIKKÖ, JARNO

Opinnäytetyö

Työn ohjaajat

Toimeksiantaja

Toukokuu 2015

Avainsanat

Pinnanmittausjärjestelmien virhetekijät

45 sivua + 2 liitesivua

Lehtori, Ari Helle

Tuntiopettaja, Mari Melotindos

Arctech Helsinki Shipyard Oy

pinnanmittaus, tankki, laiva, säiliö

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda tiivis yhteenveto laivakäytössä yleisimmin käytettyjen pinnanmittausjärjestelmien toimintaperiaatteista niin, että sitä voidaan käyttää uusien työntekijöiden perehdytyksessä. Pääasiallinen tavoite on kartoittaa virhetekijät, jotka aiheuttavat eroa manuaalisen pinnanmittauksen ja pinnanmittausjärjestelmän välille. Opinnäytetyön pääpaino asetetaan elektro-pneumaattiseen pinnanmittaukseen, sillä se on toimeksiantajan rakentamissa aluksissa ylivoimaisesti käytetyin pinnanmittausjärjestelmä.

Lähdemateriaalina työssä käytetään julkaistun kirjallisen materiaalin lisäksi järjestelmien toimittajien materiaaleja, sekä asiantuntijahaastatteluja aiheen eri osa-alueilta. Näiden pohjalta suoritetaan virhetarkastelu elektro-pneumaattiselle pinnanmittausjärjestelmälle, jonka avulla pystytään tekemään johtopäätöksiä eri virhetekijöiden vaikutuksesta järjestelmän tarkkuuteen.

Opinnäytetyön tavoitteet toteutuivat hyvin. Lisäksi luotiin vika-syy-korjaustaulukko helpottamaan virheen etsintää elektro-pneumaattisesta pinnanmittausjärjestelmästä. Virheen minimoimisen kannalta tärkeää on huomioida ja minimoida virhetekijöiden vaikutus jo suunnitteluvaiheessa, sekä noudattaa huolellisuutta järjestelmien ja niiden komponenttien asentamisessa.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Marine Technology

MÄNNIKKÖ, JARNO

Bachelor's Thesis

Supervisor

Commissioned by

May 2015

Keywords

Error Factors of the Remote Sounding Systems

45 pages + 2 pages of appendices

Ari Helle, Senior Lecturer

Mari Melotindos, Lecturer

Arcotech Helsinki Shipyard Oy

remote level sounding, tank, ship, vessel

The aim of the thesis is to create a compact summary of the operating principles of most commonly used remote sounding systems in ships to be used in the orientation of new employees. The main objective is to identify the error factors that cause a difference between the manual sounding and remote sounding system. The main focus of the thesis is on electro-pneumatic level sounding systems because they have been by far the most used in the vessels built by the commissioner.

In addition to the written material that has been published, system suppliers' own material and expert interviews from the separate sectors related to the topic have been used as source material in the study. Based on these, the error analysis of the electro-pneumatic sounding systems was carried out, and this made it possible to draw conclusions how the various error factors affect the accuracy of the system.

The objectives of the thesis were well met. In addition, a fault-cause-correction table was created to simplify error detection from the electro-pneumatic level sounding system. In order to minimize the errors, it is important to notice and minimize the effect of error factors already in a designing stage and be careful when installing the systems and their components.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO	7
2	ARCTECH HELSINKI SHIPYARD OY	8
3	PINNANMITTAUSJÄRJESTELMÄ	8
4	PINNANMITTAUSJÄRJESTELMIIN LIITTYVÄT FYSIKAALISET SUUREET	9
	4.1 Kiihtyvyys	9
	4.2 Voima	10
	4.3 Paine	10
	4.4 Lämpö	12
	4.5 Tiheys	12
5	PINNANMITTAUSJÄRJESTELMIEN ANTURIT JA KOMPONENTIT	13
	5.1 Kalvorasia	13
	5.2 Bourdonkaari	13
	5.3 Venymäliuska-anturi	14
	5.4 Pietsoresisttiivinen paineanturi	15
	5.5 Kapasitiivinen paineanturi	15
	5.6 Pt100-lämpötila-anturi	16
	5.7 Inklinometri	17
6	NESTEEN PINNANKORKEUDEN MITTAUSMENETELMÄT	17
	6.1 Mekaaniset menetelmät	18
	6.1.1 Mittatikku ja peilausmitta	18
	6.1.2 Näkölasi ja magneettinen näkölasi	18
	6.2 Hydrostaattiseen paineeseen perustuvat mittausmenetelmät	19
	6.2.1 Paikallismittarit	19
	6.2.2 Elektro-pneumaattinen pinnanmittaus (kuplailuputki)	20
	6.2.3 Tankkiin asennettava paineanturi	24
	6.3 Tankkitutkat	25

6.3.1	Mikroaaltotutka	25
6.3.2	Ultraäänitutka	26
7	VIRHETEKIJÄT PINNANMITTAUSJÄRJESTELMIEN TARKKUUESSA	26
7.1	Vertailuarvon luotettavuus	27
7.2	Virhetekijät elektro-pneumaattisissa pinnanmittausjärjestelmissä	28
7.2.1	Offset	28
7.2.2	Tiheys	28
7.2.3	Painehäviöt	29
7.2.4	Anturin virhe	29
7.3	Virhetekijät paineanturiin perustuvissa pinnanmittausjärjestelmissä	29
7.3.1	Offset	29
7.3.2	Tiheys	29
7.3.3	Anturin tarkkuus	29
7.4	Virhetekijät tankkitutkiin perustuvissa pinnanmittausjärjestelmissä	30
7.4.1	Tutkan tarkkuus	30
7.4.2	Tutkan sijainnin määrittäminen	30
7.5	Täyttöasteen laskentaan vaikuttavat virhetekijät	30
7.5.1	Teräsvähennys	31
7.5.2	Tiheyden lämpötilakorjaus	32
7.5.3	Trimmi ja kallistuskorjaus	33
7.5.4	Tankin geometria	33
8	PINNANMITTAUSJÄRJESTELMILLÄ SAAVUTETTAVA TARKKUUS	33
8.1	Offset	34
8.2	Anturin ja järjestelmän virhe	34
8.3	Tiheys	34
9	DIAGNOSTIIKKA KÄYTTÖÖNOTON YHTEYDESSÄ	40
9.1	Tulosta lähtöön -menetelmä	41
9.2	Lähdöstä tuloon -menetelmä	41
9.3	Satunnaismenetelmä	42
9.4	Puolitusmenetelmä	42
10	LOPPUPÄÄTELMÄT	42

Liite 1. Vika-syy-korjaustaulukko

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin Arctech Helsinki Shipyard Oy:n toimeksiannosta keväällä 2015. Meriteitse aluksilla kuljetettavien lastien määrä on valtava ja määrät kasvavat vuosi vuodelta. Nesteenä kuljetettavat lastit ja alusten käyttämät polttoaineet, voiteluöljyt, juomavesi, aluksen koneistossa käytettävä tekninen vesi, sekä jätevedet ja jäteöljyt varastoidaan ja kuljetetaan aluksilla erilaisissa tankeissa. Nykyaikainen pyrkimys kustannustehokkaaseen ja turvalliseen toimintaan, sekä alusten operoiminen minimimiehityksellä vaatii luotettavuutta sekä tarkkuutta tankkien pinnanmittausjärjestelmiltä. (Rauhala 2015.)

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi tankkien pinnanmittausjärjestelmät ja niiden toimintaperiaatteet. Opinnäytetyön osiota, jossa selvitetään toimintaperiaatteet, on tarkoitus käyttää uusien työntekijöiden perehdytykseen. Opinnäytetyössä pääpaino tullaan asettamaan elektro-pneumaattiseen pinnanmittaukseen, sillä se on toimeksiantajan rakentamissa aluksissa ylivoimaisesti käytetyin pinnanmittausjärjestelmä.

Pinnanmittausjärjestelmien käyttöönoton on havaittu vievän huomattavasti aikaa ja resursseja käyttöönotossa esiintyvien virheiden takia. Tästä johtuen toimeksiantaja on kiinnostunut tutkimaan ja selvittämään virhetekijät, jotka vaikuttavat pinnanmittausjärjestelmien tarkkuuteen. Tutkimuksen avulla virhetekijät voidaan minimoida jo aluksen suunnittelu ja rakennusvaiheessa.

Virheellä tankkien kaukopeilauksessa tarkoitetaan manuaalisesti tehdyn pinnanmittauksen ja pinnanmittausjärjestelmän välillä mahdollisesti olevaa eroa. Manuaalisesti suoritettun pinnanmittauksen arvoa pidetään absoluuttisen tarkkana, ja muiden järjestelmien tarkkuutta verrataan siihen. (Rauhala 2015.)

Selvitettyjen virhetekijöiden pohjalta tehdään virhetarkastelu kuvitellussa optimaalisessa käyttöönottilanteessa käyttäen kokonaisdifferentiaalia. Virhetarkastelun avulla selvitetään virheen aiheuttajien ominaispiirteitä, sekä saadaan tietoa millaiseen tarkkuuteen järjestelmällä voidaan päästä. Lopuksi tutkimusten pohjalta luodaan vika-syy- korjaustaulukko helpottamaan virheen etsintää.

## 2 ARCTECH HELSINKI SHIPYARD OY

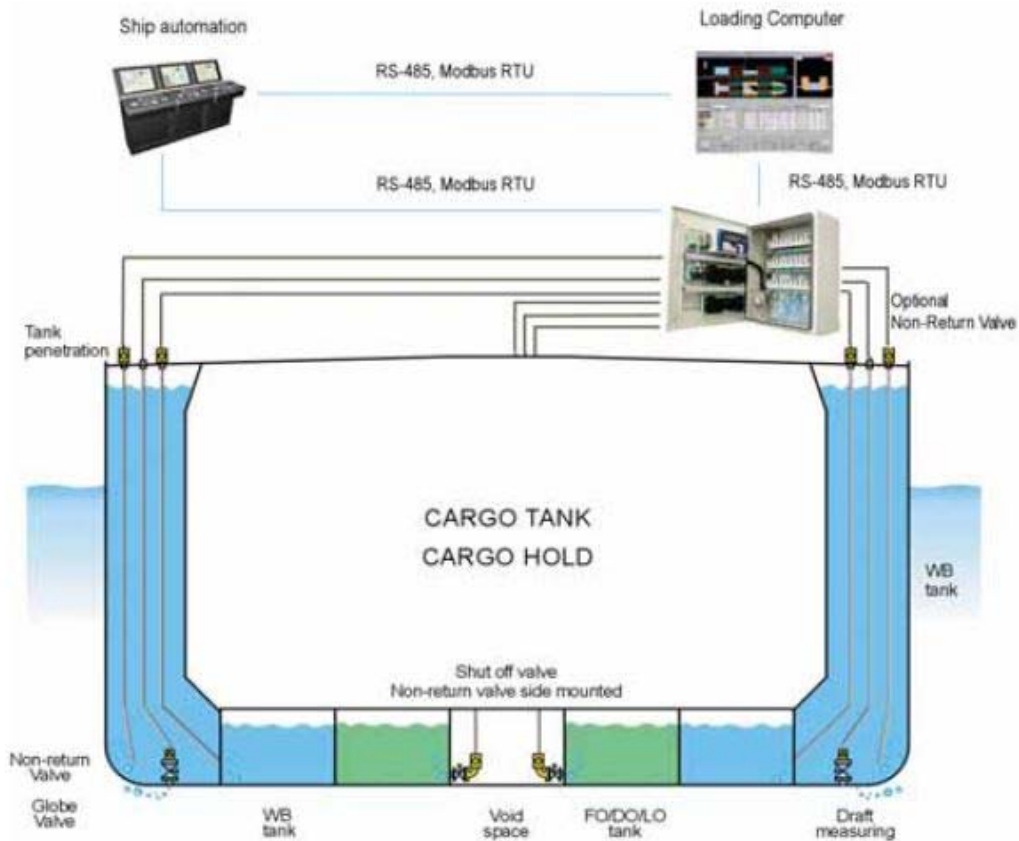
Arctech Helsinki Shipyard Oy on Helsingin Hietalahden telakalla toimiva venäläisen United Shipbuilding Corporationin omistama yritys, joka on erikoistunut arktiseen meriteknologiaan ja laivanrakennukseen. Yrityksen päätuotteita ovat jäänmurtaajat sekä arktisella alueella toimivat offshore- ja erikoisalukset. Yritys on perustettu joulukuussa 2010 ja aloitti toimintansa 1.4.2011. Arctech työllistää noin 500 työntekijää. (Arctech 2015.)

Arctechilla on vankka kokemus laivanrakennuksesta. Helsingin telakalla on rakennettu laivoja jo 150 vuotta. Kaikista maailman toiminnassa olevista jäänmurtaajista 60 prosenttia on rakennettu Helsingin telakalla. Arctech pyrkii jatkuvasti kehittämään laivanrakennukseen uusia ratkaisuja ja olemaan alan edelläkävijä. (Arctech 2015.)

## 3 PINNANMITTAUSJÄRJESTELMÄ

Pinnanmittausjärjestelmä mittaa tankkien pinnankorkeuksia. Pinnanmittausjärjestelmästä pinnankorkeustieto lähetetään väyläviestinä laiva-automaatiolle ja lastitietokoneille, joihin on syötetty tankkien hydrostaattinen data. Laiva-automaatio ja lastitietokone saavat myös tiedon mitattavan nesteen lämpötilasta. Nesteen tiheys voidaan syöttää tietokoneelle käsin. Näiden tietojen perusteella laiva-automaatio ja lastitietokone laskevat tankissa olevan nesteen tilavuuden ja massan, jotka ovat käyttäjäystävällisesti luettavissa näyttöpäätteeltä. Järjestelmään voidaan lisäksi liittää ylä- ja alarajhälytyksiä, sekä esimerkiksi pumppuautomaatiikkaa. (Rauhala 2015.) Kuvassa yksi esitetään electro-pneumaattisen pinnanmittausjärjestelmän peruseriaate, sekä pinnanmittausjärjestelmän kytkentäperiaate laiva-automaation ja lastitietokoneen kesken.





Kuva 1. Elektro-pneumaattinen pinnanmittausjärjestelmä (Scanjet 2014)

#### 4 PINNANMITTAUSJÄRJESTELMIIN LIITTYVÄT FYSIKAALISET SUUREET

Opinnäytetyössä käsiteltävien asioiden kannalta on tärkeää ymmärtää muutamien fyysikaalisten suureiden ominaisuudet. Fysikaalisten suureiden avulla pystytään kuvaamaan fyysikaalisen systeemin ominaisuuksia ja siinä tapahtuvia ilmiöitä. Suureen arvon suuruudella voidaan kuvata ilmiön voimakkuutta tai kuinka paljon jotain tiettyä ominaisuutta systeemissä on. (Suvanto 2012, 21.) Seuraavaksi kerrataan pinnanmittausjärjestelmien kannalta tärkeät fyysikaaliset suureet ja niiden ominaisuudet.

##### 4.1 Kiihtyvyys

Kiihtyvyyden avulla ilmaistaan nopeuden muutosta aikaväliä kohden. Kiihtyvyyden SI-järjestelmän mukainen tunnus on  $(a)$ . Kiihtyvyyden yksikkö on  $\text{m/s}^2$ . Opinnäytetyön kannalta tärkeän maanvetovoiman aiheuttama putoamiskiihtyvyyden tunnus on  $(g)$  ja sen likiarvo maapallolla keskimäärin on  $9,82 \text{ m/s}^2$ . (Suvanto 2012, 64,79.)

## 4.2 Voima

Voima on vektorisuure, jonka SI-järjestelmän mukainen tunnus on  $F$  ja yksikkö newton ( $N$ ). Voiman vektorisuure kuvaa fysiikassa kappaleen ja ympäristön vuorovaikutusta. Vektorisuureen suunta ilmoittaa ympäristön kappaleeseen kohdistaman voiman suunnan. Voiman itseisarvo kuvaa voiman vaikutuksen suuruutta. Voimatyyppejä on useita, kuten tuki-, jännitys-, kitka-, vastus- ja painovoima. Opinnäytetyön kannalta tärkein voima on painovoima ( $F_g$ ), jossa kiihtyvyytenä on maan vetovoiman kiihtyvyys ( $g$ ). Newtonin toisen lain mukaan voima on kiihtyvyyden aiheuttaja, joten painovoiman yksikö  $N$  saadaan yhtälöstä (1). (Suvanto 2012, 99-105.)

$$[\vec{F}_g] = [m][\vec{g}] = N = kg * \frac{m}{s^2} \quad (1)$$

jossa	$F_g$	painovoima	[N]
	$m$	massa	[kg]
	$g$	putoamiskiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]

## 4.3 Paine

Paine on voiman intensiivisyyttä kuvaava suure, jonka tunnus on ( $p$ ) ja SI-järjestelmän mukainen yksikkö on pascal (Pa). Paineella kuvataan voimaa pinta-alayksikköä kohden yhtälön (2) mukaan. (Suvanto 2012, 309-310.)

$$[p] = \frac{[F]}{[A]} = \frac{N}{m^2} = Pa \quad (2)$$

jossa	$p$	paine	[Pa]
	$F$	voima	[N]
	$A$	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]

Paineista puhuttaessa on huomioitava puhutaanko ylipaineesta vai absoluuttisesta paineesta. Usein käytössä olevat painemittarit ilmoittavat ylipaineen, esimerkiksi ilmanpaineeseen verrattuna. Kun halutaan tietää absoluuttinen paine mittarin näyttäessä ylipainetta, on mittarilukemaan lisättävä tilanteesta riippuen jokin vertailupaine, kuten yhtälössä (3). (Suvanto 2012, 318-319.)

$$p = p_e + p_0 \quad (3)$$

jossa	$p$	absoluuttinen paine	[Pa]
	$p_e$	ylipaine	[Pa]
	$p_0$	sovittu vertailuarvo	[Pa]

Opinnäytetyön kannalta tärkeä nesteen aiheuttama hydrostaattinen paine syntyy nestepatsaan painon ja Maan vetovoiman kiihtyvyyden synnyttämästä voimasta pinta-ala-yksikköä kohden yhtälön (4) mukaisesti (Suvanto 2012, 326-327).

$$P_h = \rho gh - p_0 \quad (4)$$

jossa	$P_h$	hydrostaattinen paine	[Pa]
	$\rho$	nesteen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$g$	putoamiskiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]
	$h$	nestepatsaan korkeus	[m]
	$p_0$	vertailupaine	[Pa]

#### 4.4 Lämpö

Lähestulkoon kaikkien systeemien teknisesti tärkeät ominaisuudet ovat lämpötilariippuvaisia. Lämpöä ei pystytä suoraan mittaamaan, vaan lämpötilan mittaaminen perustuu aina jonkin lämmön aiheuttaman ilmiön mittaamiseen. Yksi tärkeimmistä lämmön aiheuttamista ilmiöistä on kappaleen tai aineen lämpötilalaajeneminen. SI-järjestelmän mukainen lämpötilan yksikkö on kelvin (K) ja tunnus T. Kelvin-asteikko on absoluuttinen lämpötila-asteikko, jonka nollakohta on absoluuttinen nollapiste. (Suvanto 2012, 401-402.)

Kelvinin johdannaisyksikkö on celsiusaste. Celsius-asteikko on määritetty veden sulamis- ja kiehumispisteen mukaan. Celsiusasteen tunnus on (°C). Puhuttaessa lämpötilaerosta kelvin- ja celsius-asteikon muutokset ovat yhtä suuret. (Suvanto 2012, 402.)

Opinnäytetyön kannalta tärkeää on lämpötilan aiheuttamat tilavuudenmuutokset ja sen vaikutus tiheyteen, sillä tiheys vaikuttaa hydrostaattiseen paineeseen. Lämpötilan aiheuttama tilavuuden muutos voidaan laskea yhtälön (5) mukaisesti. (Suvanto 2012, 409.)

$$\Delta V = V\gamma\Delta t \quad (5)$$

jossa	$\Delta V$	tilavuuden muutos	[m <sup>3</sup> ]
	V	alkuperäinen tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
	$\gamma$	tilavuuden lämpötilakerroin	[1/K]
	$\Delta t$	lämpötilan muutos	[K]

#### 4.5 Tiheys

Tiheyden tunnus on  $\rho$  ja yksikkö on kg/m<sup>3</sup>. Lämpötilan ollessa vakio aineen tilavuuden ja massan suhde pysyy vakiona ja tätä kutsutaan tiheydeksi. Toisin sanoen tiheys ilmaisee kuinka raskaasta aineesta on kyse. Aineen tiheys määritetään yhtälön (6) mukaisesti. On kuitenkin muistettava lämpötilan vaikutus tiheyteen, kuten edellä totesimme (Suvanto 2012, 22.)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

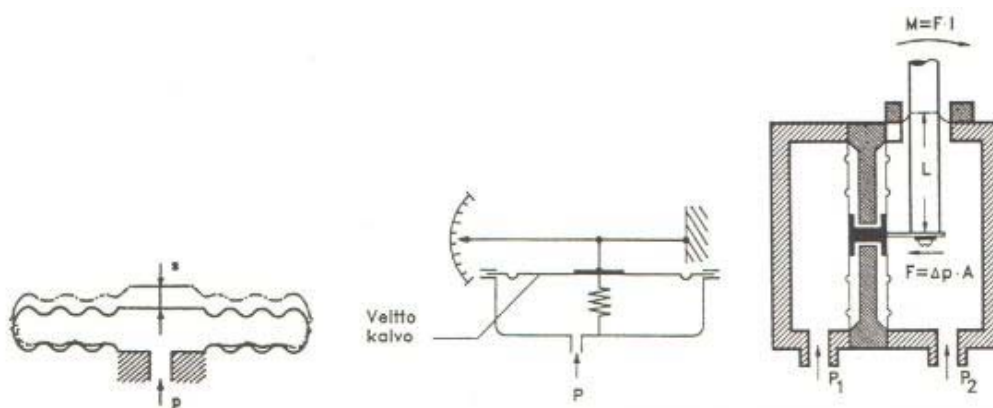
jossa	$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
	m	massa	[kg]
	V	tilavuus	[m <sup>3</sup> ]

## 5 PINNANMITTAUSJÄRJESTELMIEN ANTURIT JA KOMPONENTIT

Tässä luvussa käydään läpi pinnanmittausjärjestelmien kannalta tärkeiden antureiden ja komponenttien toimintaperiaatteet. Tärkeimpinä voidaan pitää paineen, lämpötilan ja laivan asennon mittaamiseen käytettyjä antureita ja komponentteja.

### 5.1 Kalvorasia

Kalvorasia on litteä ohuesta metallilevystä tehty rasia, joka laajenee tai supistuu paineen vaikutuksesta. Kalvorasian avulla voidaan välittää paine väliaineen avulla anturille tai anturi voi olla kytkettynä suoraan kalvorasiaan. (Pihkala 2004, 27.)

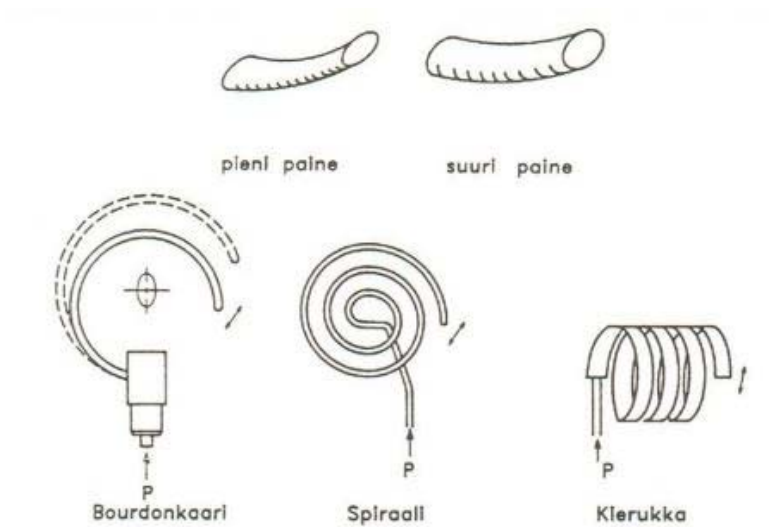


Kuva 2. Kalvorasia, veittokalvo ja vastajousi, sekä paine-erokenno (Pihkala 2004, 27)

### 5.2 Bourdonkaari

Bourdonkaari on yleisin ja tunnetuin paineenmittausmenetelmä. Bourdonkaari eli paineputki on joko käyrä tai kierretty toisesta päästä suljettu litteä putki. Mitattava paine

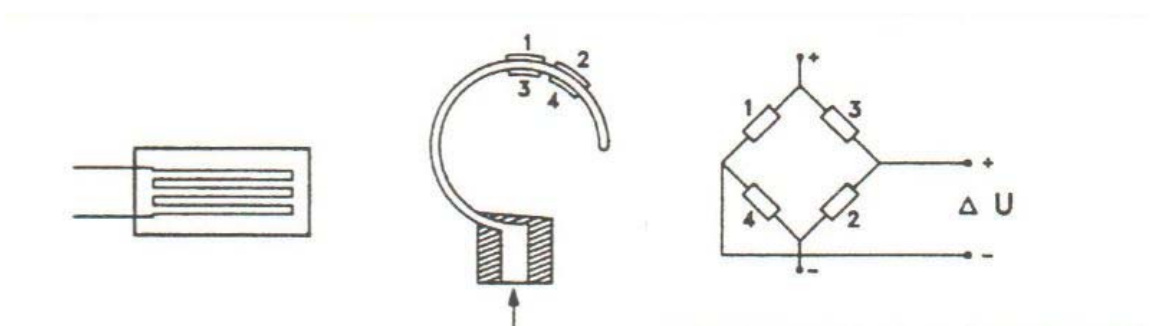
ohjataan putken sisälle, jolloin putki pyrkii pullistumaan ja oikeenomaan. Kuvassa kolme esitetään bourdonkaaren sekä erilaisten paineputkien rakenne ja toimintaperiaate. (Pihkala 2004, 23.)



Kuva 3. Erityyppisiä paineputkia ja niiden toimintaperiaatteet (Pihkala 2004, 24)

### 5.3 Venymäliuska-anturi

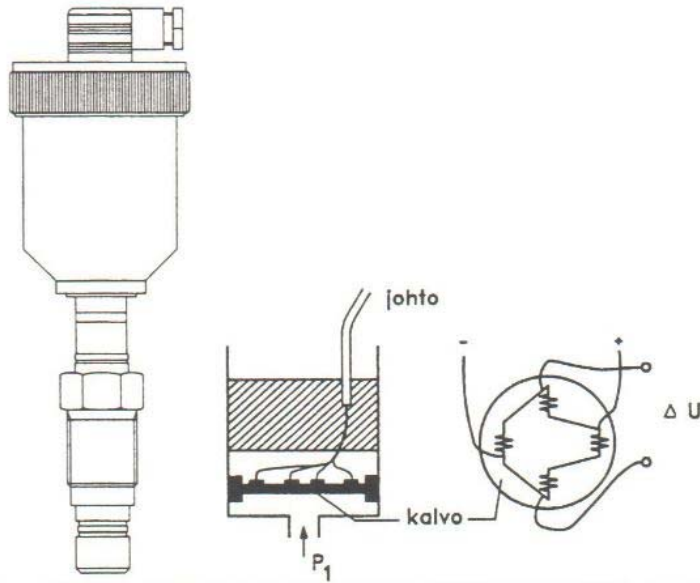
Venymäliuskalla mitataan paineen aiheuttamia mekaanisia muutoksia. Venymäliuska on ohut liuska, johon on kiinnitetty metallilangasta tai foliosta valmistettu vastus. Paineen aiheuttamat mekaaniset muutokset aiheuttavat muutoksia liuskassa olevien vastusten pituuteen, jolloin venymäliuskan vastuksen resistanssi muuttuu. Anturissa venymäliuska kiinnitetään kalvorasian kylkeen tai bourdonkaareen, jolloin venymäliuskalla voidaan mitata painetta. Kuvassa neljä esitetään venymäliuskan toimintaperiaate ja sen käyttö bourdonkaaren kanssa. (Pihkala 2004, 28.)



Kuva 4. Venymäliuska ja sen käyttö bourdonkaaren kanssa (Pihkala 2004, 28)

#### 5.4 Pietsoresistiivinen paineanturi

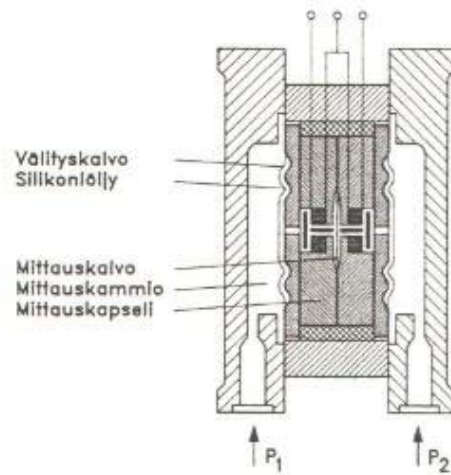
Pietsoresistiivistä paineanturia kutsutaan myös puolijohdevenymäliuska-anturiksi. Kun paineen aiheuttamalla voimalla vaikutetaan anturissa olevaan piikalvoon, muuttuu sen resistanssi piihin syntyvän jännityksen vaikutuksesta. Kuvassa viisi on kuvattu pietsoresistiivisen paineanturin rakenne ja toimintaperiaate. (Pihkala 2004, 30.)



Kuva 5. Pietsoresistiivinen paine-eroanturi (Pihkala 2004, 30)

#### 5.5 Kapasitiivinen paineanturi

Kapasitiivisessa paineanturissa on sisäänrakennettu differentiaalikonkondensaattori. Differentiaalikonkondensaattorin levyt on tehty paine-erokammion seinämiin. Liikkuvan levyn muodostaa joustava kalvo painekammion välissä. Mitattavat paineet tuodaan kammioihin paineen välittimellä, esimerkiksi kalvorasiolla, jonka väliaineena ja samalla eristeenä toimii silikoniöljy. Paineen mittaaminen anturilla perustuu kalvonliikkeen aiheuttamaan kapasitanssin muutokseen. Kuvassa kuusi esitetään kapasitiivisen paineanturin rakenne. (Pihkala 2004, 30-31.)



Kuva 6. Kapasitiivinen paine-eroanturi (Pihkala 2004, 31)

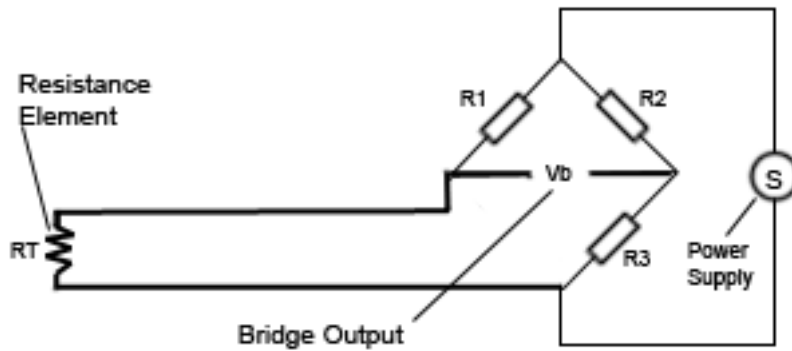
### 5.6 Pt100-lämpötila-anturi

Pt100-lämpötila-anturin toiminta perustuu metallin sähköisen resistanssin mittaamiseen, joka on riippuvainen lämpötilasta. Koska metallit ovat resistanssin lämpötilaker-toimeltaan positiivisia, kasvaa resistanssi lämpötilan noustessa. Pt100-lämpötila-antu-rissa käytetään platinaa, jonka resistanssi nollassa celsius asteessa on 100 ohmia. Yh-den asteen lämpötilan muutos vastaa  $0,39 \Omega$ :n muutosta resistanssissa. ( SKS Sensors.)



Kuva 7. Pt100 anturi (Oy Meyer vastus)





Kuva 8. Pt100 toimintaperiaate (Thermibel)

## 5.7 Inklinometri

Inklinometri eli kallistuskulmamittaria käytetään aluksen kallistuksen määrittämiseen. Sen toiminta perustuu puolijohdepainovoimasensoriin. Sensorin viesti muutetaan vahvistimella 4 – 20mA signaaliksi. Inklinometri asennetaan tukevasti paikkaan, jossa lämpötilamuutokset ovat mahdollisimman pieniä. (Damcos 2008.)



Kuva 9. Inklinometri (Damcos 2008)

## 6 NESTEEN PINNANKORKEUDEN MITTAUSMENETELMÄT

Nesteiden pinnankorkeuksien mittaamiseen eli merenkulun termein peilaamiseen on olemassa useita eri menetelmiä. Tässä luvussa käydään läpi yleisimmät laivaympäristössä käytettävät menetelmät ja niiden toimintaperiaatteet.

## 6.1 Mekaaniset menetelmät

### 6.1.1 Mittatikku ja peilausmitta

Mittatikku tai peilausmitta, joka esitetään alla olevassa kuvassa, on yksinkertainen ja halpa tapa todeta pinnankorkeus luotettavasti. Pinnankorkeuden mittaus peilausmitalla tapahtuu laskemalla peilausmitta peilausputkesta tankin pohjalle, jonka jälkeen mitta kelataan ylös ja luetaan pinnankorkeus. (Pihkala 2004, 89.) Pinnankorkeuden lukemisen helpottamiseksi on olemassa peilauspastoja eri nesteille, sillä peilausmittaa käytettäessä pinnankorkeuden lukeminen saattaa olla haastavaa etenkin kirkkaita nesteitä peilattaessa. Peilauspastat reagoivat väriä muuttamalla, jolloin nesteen korkeus on helposti luettavissa. (Rauhala 2015.)

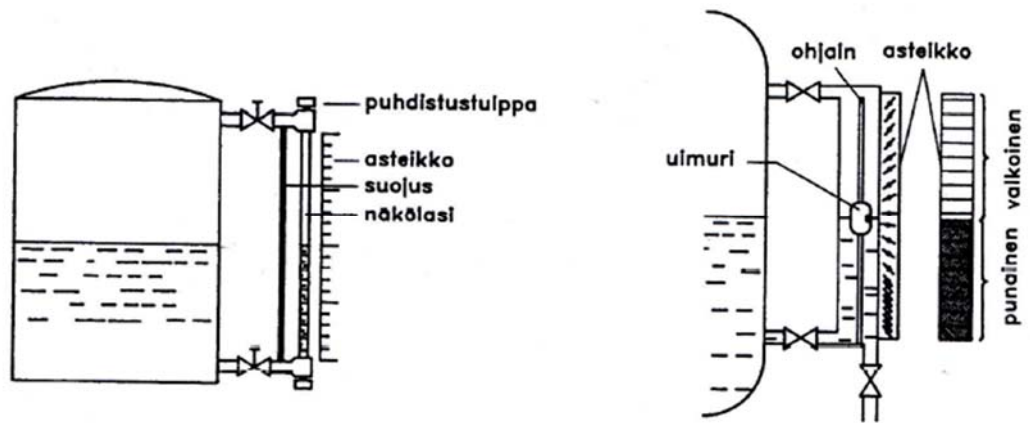


Kuva 10. Peilausmitta luodilla (Juhani Suokari Oy 2011)

### 6.1.2 Näkölasi ja magneettinen näkölasi

Näkölasi soveltuu hyvin pienien säiliöiden pinnankorkeuksien mittaamiseen. Näkölasi on säiliöön yhdistetty säiliönkorkeinen läpinäkyvä putki, josta pinnankorkeuden voi lukea. Näkölasi soveltuu käytettäväksi sekä avoimessa että suljetussa säiliössä. Mikäli säiliössä oleva neste on erittäin kirkasta tai tahraavaa, saattaa nesteen pinnan havaitseminen olla haastavaa. (Pihkala 2004, 89.)

Magneettinen näkölasi muistuttaa näkölasia. Kyseessä on kuitenkin uimurimittari, jossa kelluva magneettinen uimuri on uimuriputken sisällä. Uimuriputki on säiliöön yhdistetty säiliön korkeinen ei-magneettinen putki. Uimuriputken ulkopuolelle on asennettu terässäleikkö, jonka säleet ovat eriväriset eri puolilta. Uimurin noustessa terässäleet kääntyvät ja pinnan korkeus voidaan lukea. (Pihkala 2004, 89.)



Kuva 11. Näkölasit (vas.) ja Magneettinen näkölasit (oik.) (Pihkala 2004, 89)

## 6.2 Hydrostaattiseen paineeseen perustuvat mittausmenetelmät

Säiliössä olevan nesteen pinnankorkeutta voidaan mitata nesteen aiheuttaman hydrostaattisen paineen avulla. Hydrostaattinen paine on riippuvainen nestepatsaan korkeudesta eli nestepinnan korkeudesta ja nesteen tiheydestä. Kun Maan vetovoiman kiihtyvyys on vakio ja hydrostaattinen paine sekä nesteen tiheys on tunnettu, voidaan pinnankorkeus määrittää hydrostaattisen paineen yhtälöstä (7). (Pihkala 2004, 92.)

$$p = \rho gh \Leftrightarrow h = \frac{p}{\rho g} \quad (7)$$

jossa	$h$	nestepinnan korkeus	[m]
	$p$	hydrostaattinen paine	[Pa]
	$\rho$	nesteen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$g$	Maan vetovoiman kiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]

### 6.2.1 Paikallismittarit

Paikallismittareiden toiminta perustuu mitattavan nesteen aiheuttamaan hydrostaattiseen paineeseen. Tankin pohjalle asennetaan kalvorasia, joka siirtää hydrostaattisen paineen painemittarille. Kalvorasioita on saatavilla eri materiaaleista valmistettuina riippuen käyttökohteesta. Kunkin tankin hydrostaattisen datan perusteella toimittaja valmistaa painemittarin taustaan vastaamaan kullakin paineella tankin pinnankorkeutta,

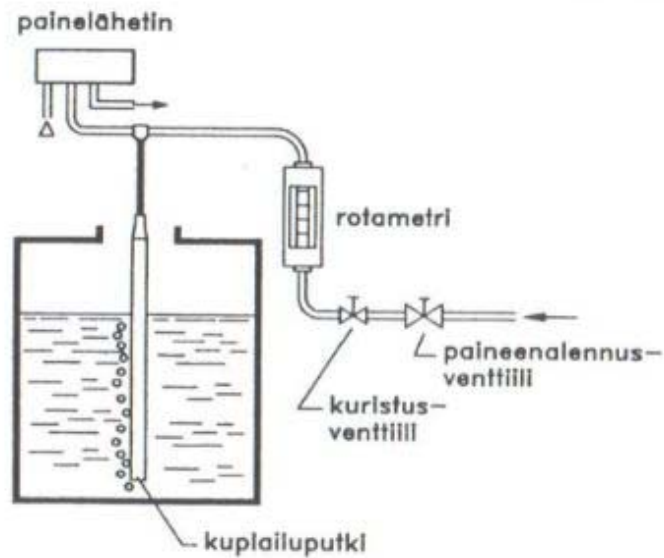
neesteentilavuutta tai täyttöastetta prosentteina. Kalvorasiaan perustuvien paikallismittareiden etuna on, että ne eivät tarvitse paineilmaa eivätkä sähköä. (Liquid Level Systems 2009.)



Kuva 12 Paikallismittari (Liquid Level Systems 2009)

#### 6.2.2 Elektro-pneumaattinen pinnanmittaus (kuplailuputki)

Elektro-pneumaattinen pinnanmittaus eli kuplailuputki on varsin yksinkertainen pinnanmittausmenetelmä, jonka perustoimintaperiaate on esitelty kuvassa 13. Elektro-pneumaattinen pinnanmittaus sopii käytettäväksi avoimissa nestesäiliöissä ja tankkeissa. Erityisen hyvin kuplailuputki sopii käytettäväksi nesteillä, jotka pyrkivät tukkiamaan mittausputket, kuten jätevesi ja jäteöljy. (Pihkala 2004, 94.) Elektro-pneumaattista pinnanmittausta, joka perustuu nesteen aiheuttaman hydrostaattisen paineen mittaamiseen tankin pohjalta, on aloitettu käyttämään 1920-luvulla. Menetelmä on erittäin tarkka ja luotettava edellyttäen tasalaatuista paineilmaa. Nykyään elektro-pneumaattinen pinnanmittaus on laajalti käytössä erityyppisissä ja kaikenkokoisissa aluksissa. Samanlaista järjestelmää voidaan käyttää tyhjien tankkien ja cofferdamien vuodon valvontaan, sekä aluksen syväyksien mittaamiseen. (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2009, 3.)



Kuva 13. Kuplailuputken toimintaperiaate (Pihkala 2004, 95)

Järjestelmä muodostuu yhdestä tai useammasta kabinetista, jotka sisältävät tankkien ja syväyksien paineanturit. Kuvassa 14 on Scanjet Macron International Ltd:n valmistama kabinetti. Yleensä yksi kabinetti sisältää noin 10 - 30 anturia. Kabinetit sijoitetaan aluksella turva-alueelle paikkaan, jonne on helppo päästä huoltamaan laitetta tai tarkastamaan laitteen toiminta. Kabinetin jokaiselta paineanturilta lähtee noin 10mm halkaisijaltaan oleva kupari- tai ruostumatonteräsputki tankille tai syväyden mittauspisteelle. Itse kuplailuputki tankin sisällä on paksumpi, noin 20 mm. Kuplailuputken alapää asennetaan mahdollisimman lähelle tankin pohjaa, jolloin mittaustulokset matalilla täyttöasteilla ovat tarkempia. (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2009, 3.)



Kuva 14. Kabinetti (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2009)

Järjestelmän toiminnan kannalta on tärkeää käyttää ainoastaan hyvälaatuisia paineilmaa. Hyvän paineilman laadun takaamiseksi se käsitellään ilmankuivaimella. Tankkiin syötettävä ilma kulkee kabinetissa olevan virtausmoduulin kautta, joka sisältää paineenalennus- ja virtauksensäätöventtiilit. (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2009, 3.)

Ilmavirtaus säädetään sopivaksi kuristusventtiilin ja rotametrin avulla, jolloin putki ei pääse tukkeutumaan. Toisaalta liian suuri ilmavirta aiheuttaa painehäviöitä ja mittaustulos vääristyy. Paineilman virtaus säädetään siten, että ilma syrjäyttää putkesta nesteen ja alkaa kuplailta putken alapäästä, jolloin ilmanpaine putken yläpäässä vastaa nesteen aiheuttamaa hydrostaattista painetta. (Pihkala 2004, 94.)

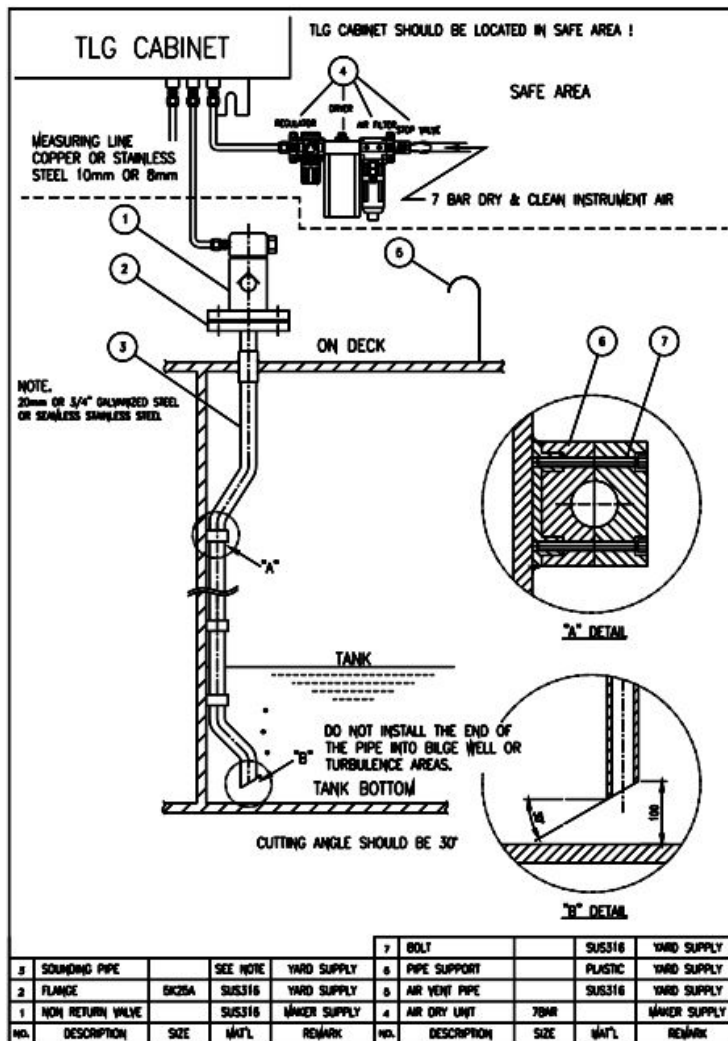
Kuplailuputken yläpään syntyvä nesteen hydrostaattista painetta vastaava paine mitataan kabinetissa olevalla anturilla. Tankin pinnankorkeuden laskentaan huomioidaan lisäksi painehäviöt, jotka syntyvät kabinetilta tankkiin menevässä ilmaputkessa, sekä offset eli kuplailuputken alareunan ja tankin pohjan välinen etäisyys. Kabinetilta pinnankorkeustieto lähetetään väyläviestinä laiva-automaatiojärjestelmälle ja / tai lastitietokoneelle. Kunkin tankin korkeustieto on usein luettavissa myös kabinetista. (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2009, 3.)

Putkiasennukset eivät yleensä sisälly laitetoimitukseen vaan jäävät telakan hoidettavaksi. Pinnanmittausjärjestelmän putkisto muodostuu seuraavista osista: (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2011, 10.)

- Tankin sisälle asennettavasta kuplailuputkesta
- Putkesta kabinetilta tankille tai syväyden mittauspisteelle
- Paineilman syöttölinjasta kabinetille
- Atmosfäärin ilmanpaineen kompensatiolinjasta kabinetille
- Sulku- ja takaiskuventtiileistä
- Laipioiden ja kansien läpivienneistä

Lisäksi telakan on suoritettava vuototesti putkistolle. Mikäli vuotoja havaitaan, on ne korjattava ennen käyttöönottoa. (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2011, 10.)

Tankin sisälle tuleva kuplailuputki suositellaan valmistettavan ruostumattomasta teräksestä tai galvanoidusta teräksestä. Kuplailuputki voidaan viedä tankkiin tankin katoilta tai sivulta. Putki tulee kiinnittää tankin seinämään asiaankuuluvalla tuella tärinän ehkäisemiseksi. Kuplailuputki asennetaan mahdollisimman lähelle manuaalipinnanmittausputkea, jolloin tulokset ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Kuplailuputki asennetaan 50 mm – 100mm tankin pohjan yläpuolelle. Tätä väliä kutsutaan offsetiksi. Tämä etäisyys kirjataan ylös jokaisesta tankista järjestelmän offset korjausta varten. Tämä voi myös tarkoittaa sitä, että tankissa saattaa olla nestettä, vaikka järjestelmän mukaan se olisikin tyhjä. Kuplailuputken alareuna leikataan 30 asteen kulmaan, tällä varmistetaan, että kupla poistuu aina korkeammalta puolelta putkea. Kuplailuputken päätä ei saa asentaa turbulentsille alueelle. Kuvassa 15 on Scanjet Macron'in asennuskuva tankinpäältä läpivietävälle kuplailuputkelle. (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2011, 10.)

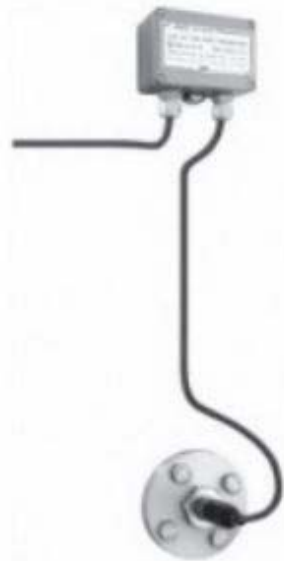


Kuva 15. Esimerkki kuplailuputken asentamisesta jossa läpivienti tankin päältä (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2011, 11)

Mikäli kuplailuputki ei sijaitse tankin keskellä, pitää mittaustulokseen tehdä trimmi- ja kallistuskorjaukset. Trimmi- ja kallistuskorjausta varten kuplailuputken alapään sijainti kirjataan jokaisesta tankista. Esimerkiksi etäisyys lähimmästä laipiosta tai rungosta pituussuunnassa (x), poikittaispituus (y) ja korkeus tankin pohjalevystä (z). (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2011, 10.)

### 6.2.3 Tankkiin asennettava paineanturi

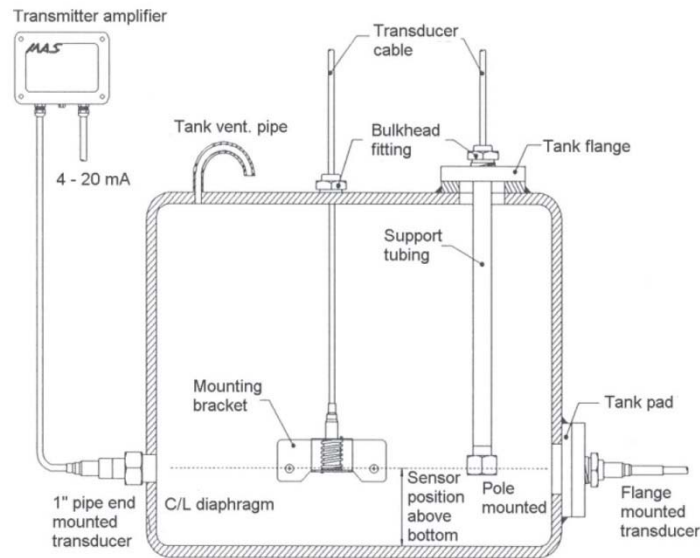
Tankkiin asennettava paineanturi mittaa kuplailuputken tavoin nesteen aiheuttamaa hydrostaattista painetta. Tankkiin asennettavat paineanturit ovat usein niin kutsuttuja kalvotyyppeisiä paineantureita. Painetieto menee anturilta vahvistimelle, josta saadaan pinnankorkeus neljästä kahteenkymmeneen milliampeerin virtaviestinä. Vahvistimelta virtaviesti jatkaa I/O kabinetille, josta edelleen väyläviestinä laiva-automaatiolle ja lastitietokoneelle. Kuvassa 16 on tankin kylkeen laipalla asennettava anturi, sekä vahvistin. (Emerson Process Management 2012.)



Kuva 16. Anturi ja vahvistin (Emerson Process Management, 2012)

Anturi voidaan asentaa tankkiin monella eritavalla, kuten laipalla tai putkijuntturi tyyppisellä liitännällä tankin kylkeen, tukiputkeen tai kannattimeen tankin sisällä. Eri-laisia asennustapoja esitetään kuvassa 17. (Emerson Process Management 2012.)





Kuva 17. Paineanturin asennustavat (Emerson Process Management 2012, 2)

### 6.3 Tankkitutkat

Tankkitutkia on olemassa mikroaaltoihin, ultraääneen ja laseriin perustuvia. Tankkitutkia käytetään erityisesti tankkilaivojen lastitankkien pinnanmittaukseen, sillä se on ainoa tapa mitata nestepinnan korkeutta ilman kosketusta mitattavaan nesteeseen. Toisin kuin hydrostaattiseen paineeseen perustuvissa mittausmenetelmissä, tankkitutkien pinnanmittaus perustuu tankin yläreunan ja nestepinnan välisen etäisyyden mittaamiseen (Eng. ullage). Käytettäessä rinnakkain tankkitutkaa ja hydrostaattisen paineen menetelmää sekä lämpötilan mittausta saadaan laiva-automaatiolle ja lastitietokoneelle tarvittavat tiedot nesteen tiheyden määrittämiseksi. (Rauhala, 2015.)

#### 6.3.1 Mikroaaltotutka

Mikroaaltotutka asennetaan mittauskohteen yläpuolelle. Mikroaaltotutkan toiminta perustuu 5,8 GHz:n taajuudella lähetettäviin valonnopeudella kulkeviin lyhyisiin mikroaaltopurskeisiin. Mikroaaltopurskeet heijastuvat nesteen pinnasta takaisin, jolloin nestepinnan etäisyys tankin yläreunasta saadaan jakamalla mikroaaltopurskeen kulkuaika kahdella ja kertomalla se valonnopeudella. Pinnankorkeus saadaan laskettua, kun tiedetään tankin korkeus ja anturin sijainti. Mikroaaltotutkalla pystytään mittaamaan nopeita pinnan muutoksia ja tarkkuus on luokkaa  $\pm 3$  mm. (Pihkala 2004, 100.) Alla olevassa kuvassa on mikroaaltotutka asennettuna säiliöaluksen kannelle.



Kuva 18. Mikroaaltoihin perustuva tankkitutka (Scanjet)

### 6.3.2 Ultraäänitutka

Ultraäänitutka voidaan asentaa mitattavan nesteen ylä- tai alapuolelle. Ultraäänitutka lähettää sinimuotoista ultraäänipulssia, joka heijastuu mitattavan nesteen pinnasta takaisin. Nestepinnan etäisyys saadaan jakamalla ultraäänipulssin lähettämisestä vastaanottamiseen kulunut aika kahdella ja kertomalla väliaineen äänennopeudella. Ultraäänipulssien lähettämiseen ja vastaanottamiseen voidaan tarvittaessa käyttää yhtä tai kahta anturia. Ultraäänipulssi saadaan aikaiseksi esimerkiksi pietsosähköisellä anturilla. (Pihkala 2004, 100.)

## 7 VIRHETEKIJÄT PINNANMITTAUSJÄRJESTELMIEN TARKKUUDESSA

Tässä luvussa kartoitetaan virhetekijät pinnanmittauksessa, sekä virhetekijät jotka vaikuttavat tankissa olevan nesteen tilavuuden laskentaan järjestelmässä. Virhetekijät kartoitetaan haastattelemalla Arctech Oy:n henkilökuntaa, sekä järjestelmien toimittajia ja tutkimalla eri laitevalmistajien manuaaleja. Virheellä pinnanmittauksessa tarkoitetaan manuaalisesti tehdyn pinnanmittauksen ja pinnanmittausjärjestelmän välillä mahdollisesti olevaa eroa. Tilavuuden virheellä järjestelmässä tarkoitetaan eroa joka syntyy laiva-automaation ja lastitietokoneen laskeman tilavuuden ja manuaalisesti tehdyn pinnanmittauksen välille, kun manuaalisen pinnanmittauksen tulosta verrataan

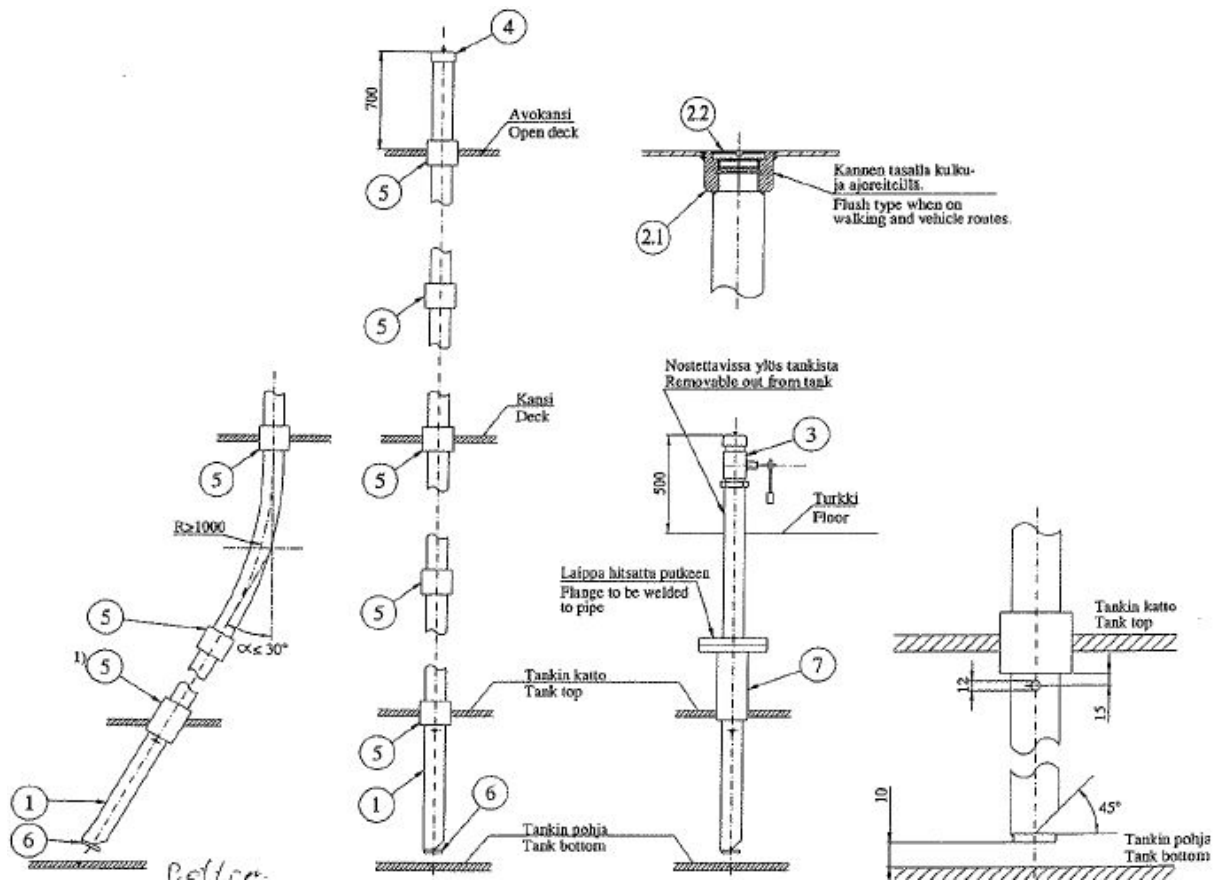
tankkitaulukoon. Tankkitaulukoon on merkitty kutakin pinnankorkeutta vastaava tilavuus. Alla on esimerkki tankkitaulukosta.

Taulukko 1. Esimerkki tankkitaulukosta (Arctech Oy 2014)

GAUGE	1.5M BY HEAD	1.0M BY HEAD	0.5M BY HEAD	0.0M EVEN KEEL	0.5M BY STERN	1.0M BY STERN	1.5M BY STERN
cm	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9
10	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.3
15	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8
20	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.4	2.3
25	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	2.9	2.8
30	4.0	3.9	3.8	3.7	3.6	3.4	3.3
35	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	3.9	3.8
40	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.3
45	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9
50	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4
55	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9
60	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.4
65	7.6	7.5	7.4	7.3	7.1	7.0	6.9
70	8.1	8.0	7.9	7.8	7.7	7.5	7.4
75	8.6	8.5	8.4	8.3	8.2	8.1	8.0
80	9.2	9.1	8.9	8.8	8.7	8.6	8.5
85	9.7	9.6	9.5	9.4	9.2	9.1	9.0
90	10.2	10.1	10.0	9.9	9.8	9.7	9.5
95	10.8	10.7	10.5	10.4	10.3	10.2	10.1
100	11.3	11.2	11.1	11.0	10.8	10.7	10.6
105	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4	11.3	11.1
110	12.4	12.3	12.2	12.0	11.9	11.8	11.7
115	12.9	12.8	12.7	12.6	12.5	12.3	12.2
120	13.5	13.4	13.2	13.1	13.0	12.9	12.8
125	14.0	13.9	13.8	13.7	13.6	13.4	13.3
130	14.6	14.5	14.3	14.2	14.1	14.0	13.9

## 7.1 Vertailuarvon luotettavuus

Pinnanmittausjärjestelmän tarkkuutta määrittäessä pitää olla manuaalisesti mitattu pinnankorkeus, johon pinnanmittausjärjestelmän arvoa verrataan. Vaikka manuaalista pinnanmittausta pidetään absoluuttisen tarkkana, on siihen suhtauduttava kriittisesti. Esimerkiksi käytettäessä luodilla varustettua peilausmittaa, joka lasketaan manuaalipinnanmittausputkesta alas, on mahdollisuus lukuvirheeseen tai peilausmittaan voi päästä löysää, jolloin saadaan väärä tulos. Myöskään manuaalisen pinnanmittauksen putkea ei viedä aivan tankin pohjalle asti, vaan noin 10 mm tankin pohjan yläpuolelle ja putken alapäähän tulee prikka, jolloin manuaalipinnanmittausputken offsetin määrittämisessä voi syntyä virhe. Kuvassa 19 on manuaalipinnanmittausputken asennusohjeita. Manuaalipinnanmittausputkea ei myöskään aina pystytä rakentamaan suoraan, vaan joudutaan tekemään mutkia, jolloin tankkitaulukoita varten putken muodot ja sijainti tulee määrittää tarkasti. (Rauniomaa 2015.)



Kuva 19. Manuaalipinnanmittausputken asennustapoja (Arctech Oy 2014)

## 7.2 Virhetekijät elektro-pneumaattisissa pinnanmittausjärjestelmissä

### 7.2.1 Offset

Ensimmäinen tekijä, joka aiheuttaa virhettä on tarkkuus, jolla kuplailuputken alapään sijainti tankissa saadaan määritettyä. Kuplailuputken alapään ja tankinpohjan välinen etäisyys eli offset on suoraan lisättävä pinnankorkeuteen, joka lasketaan anturin mittaamasta paineesta. Lisäksi kuplailuputken alapään sijainti on määritettävä myös aluksen pituus- ja leveysuunnassa, jotta lastitietokone pystyy tekemään trimmi- ja kallistuskorjaukset. (Scanjet Macron Intl. Ltd. 2011, 10.)

### 7.2.2 Tiheys

Toinen tekijä, joka aiheuttaa virhettä on tarkkuus, jolla tankissa olevan nesteen tiheys tiedetään, koska nesteen tiheys syötetään yleensä manuaalisesti kabinettiin. On myös mahdollista, että tiheystieto syötetään laiva-automaatiojärjestelmään ja tiheystieto siirtyy sieltä pinnanmittausjärjestelmään. (Rauhala 2015.)

### 7.2.3 Painehäviöt

Kolmas tekijä, joka aiheuttaa virhettä on tarkkuus, jolla putkiston aiheuttamat painehäviöt saadaan korjattua järjestelmän käyttöönoton yhteydessä. Ilmaputket kabinetilta tankkiin saattavat joskus olla hyvinkin pitkiä ja painehäviöt putkistossa merkittäviä. (Rauhala 2015.)

### 7.2.4 Anturin virhe

Neljäs tekijä, joka aiheuttaa virhettä on itse paineanturin tarkkuus. Paine antureiden aiheuttama virhe jää kuitenkin alle 0,5 %:n (Tamminen 2015).

## 7.3 Virhetekijät paineanturiin perustuvissa pinnanmittausjärjestelmissä

### 7.3.1 Offset

Ensimmäinen tekijä, joka aiheuttaa virhettä on tarkkuus, jolla paineanturin sijainti tankissa saadaan määritettyä. Paineanturin alapään ja tankin pohjan välinen etäisyys on suoraan lisättävä pinnankorkeuteen, joka lasketaan anturin mittaamasta paineesta. Lisäksi anturin sijainti on määritettävä myös aluksen pituus- ja leveys suunnassa, jotta lastitietokone pystyy tekemään trimmi- ja kallistuskorjaukset. (Rauhala 2015.)

### 7.3.2 Tiheys

Kuten elektro-pneumaattisissa pinnanmittausjärjestelmissä myös paineanturiin perustuvissa pinnanmittausjärjestelmissä tarkkuus, jolla tankissa olevan nesteen tiheys tiedetään, vaikuttaa järjestelmän tarkkuuteen (Rauhala 2015).

### 7.3.3 Anturin tarkkuus

Kuten elektro-pneumaattisissa pinnanmittausjärjestelmissäkin kolmantena virheen aiheuttajana on paineanturin tarkkuus. Joskus mataliin pohjatankkeihin, joissa on korkea täyttö- ja ilmaputki joudutaan valitsemaan korkeamman paineluokan anturi ja kalibroimaan se matalille pinnankorkeuksille. Tästä johtuen anturin herkkyys saattaa kärsiä ja syntyy virhettä paineen mittauksessa. (Rauhala 2015.)

## 7.4 Virhetekijät tankkitutkiin perustuvissa pinnanmittausjärjestelmissä

### 7.4.1 Tutkan tarkkuus

Tutkan tarkkuus on yksi tekijä, joka vaikuttaa pinnanmittauksen tarkkuuteen. Valmistajien ilmoittamat tarkkuudet ovat erittäin hyviä, luokkaa  $\pm 3$  mm, joten itse tutkan tarkkuudesta johtuvat virheet ovat erittäin pieniä. On kuitenkin muistettava, että virheiden kumuloituessa virheen merkitys kasvaa. (Pihkala 2004, 100.)

### 7.4.2 Tutkan sijainnin määrittäminen

Tutka kalibroidaan tankin ollessa tyhjä, jolloin virhe on tutkan tarkkuus. Koska tutkalla mitataan tankin vajautta eli ullage'a ylhäältä alaspäin, on tutkan sijainti määritettävä tankkitaulukkoa varten. Tällaisessa tankkitaulukossa tankin täyttöaste ilmoitetaan vajavuuden perusteella. Mikäli tutkan sijainti on määritetty väärin aluksen pituus- ja leveysuunnassa syntyy virhettä. Virheen suuruus on riippuvainen tankin muodosta ja aluksen asennosta. (Pohjola 2015.)

## 7.5 Täyttöasteen laskentaan vaikuttavat virhetekijät

Seuraavaksi keskitytään virheen aiheuttajiin, jotka syntyvät täyttöasteen laskennassa laiva-automaatiossa. Täyttöasteen laskenta laiva-automaatiossa perustuu Napa-laskentaohjelmasta saatavaan tankkitaulukkoon. Tankkitaulukon kuvaajalta valitaan seitsemän pistettä, joiden väliin piirretyt suorat kuvaavat mahdollisimman hyvin kuvaajaa. Alla olevassa taulukossa on esitetty erään aluksen painolastitankin tankkitaulukko ja sen kuvaaja, josta on valittu edellä mainitut seitsemän pistettä. Nämä pisteet syötetään laiva-automaation tietokoneelle. Pinnanmittausjärjestelmältä saadun pinnankorkeustiedon perusteella ja tankkitaulukosta sinne syötettyjen pisteiden perusteella laiva-automaatio laskee täyttöasteen tilavuutena. (Pohjola 2015.)

Taulukko 2. Erään aluksen painolastitankin pinnanmittausjärjestelmän tankkitaulukko ja sen kuvaaja (Arctech Oy 2014)

Arctech

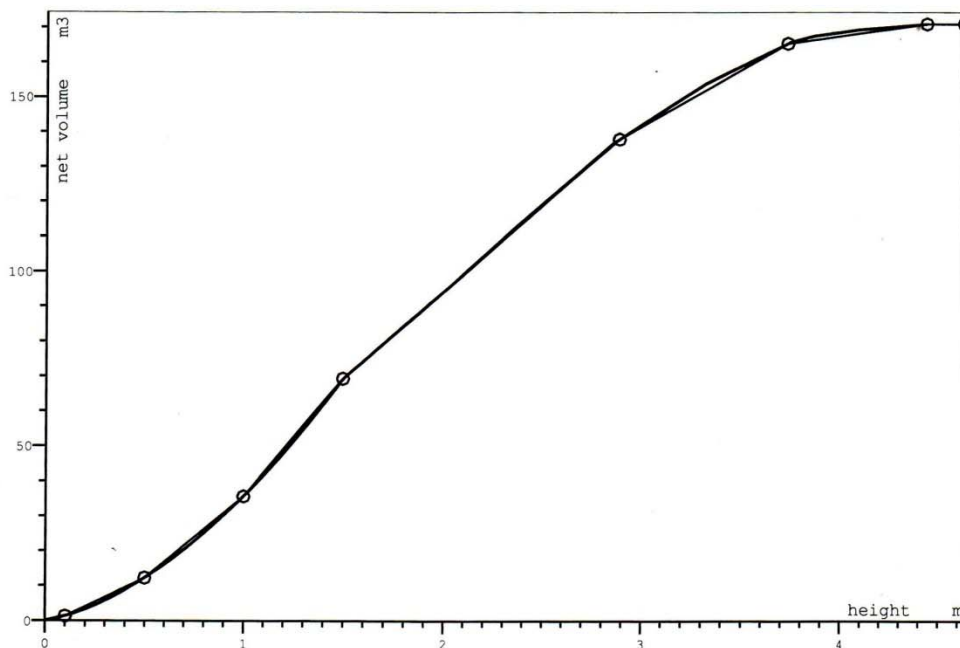
REMOTE AND LOCAL  
SOUNDING TABLES

Compartment code ..... : BW4  
 NAPA compartment ident ..... : R080001  
 Compartment descr ..... : BALLAST WATER  
 Contents ..... : BALLAST WATER (BW, RHO=1.025)

Net volume ..... : 170.953 m<sup>3</sup>  
 ZMIN from BL ..... : 0.000 m  
 Tank height ..... : 4.459 m  
 Sound. dev. height from tank bottom . : 0.100 m

Pressure P is listed with density RHO = 1 t/m<sup>3</sup>

H mm	GAUGE mm	I mA	P mbar	VNET m <sup>3</sup>	RS-VREAD m <sup>3</sup>	MS/LS-VREAD m <sup>3</sup>
100	0	4.0	0	1.3	_____	_____
500	400	5.4	39	12.2	_____	_____
1000	900	7.2	88	35.7	_____	_____
1500	1400	8.9	137	69.4	_____	_____
2900	2800	13.8	275	138.0	_____	_____
3750	3650	16.8	358	165.4	_____	_____
4459	4359	19.3	427	171.0	_____	_____
4650	4550	20.0	446	171.0	_____	_____



### 7.5.1 Teräsvähennys

Teräsvähennyksellä tarkoitetaan tilavuutta, jonka tankin sisällä olevat jäykistäjät ja putket kuluttavat tankin tilavuudesta. Teräsvähennyksessä otetaan huomioon myös laivanrakennuksessa käytetyt toleranssit. Laskennallisesti teräsvähennys on 1,7 – 2,8 prosenttia tankin tilavuudesta. Vakioteräsvähennyksenä käytetään kahta prosenttia.

Tämä syötetään NAPA–ohjelmaan, josta tankkitaulukot saadaan. Käytännössä teräs-vähennys vaikuttaa eri tavalla tankin eri täyttöasteilla. Ohjelma kuitenkin olettaa teräs-vähennyksen tasaiseksi kaikilla tankin täyttöasteilla. Tämä saattaa aiheuttaa virhettä, joka huomataan, kun tankkia täytetään virtausmittarin läpi ja verrataan automaation laskemaa tilavuutta virtausmittarin lukemaan. (Pohjola 2015.)

### 7.5.2 Tiheyden lämpötilakorjaus

Nesteen tiheys on riippuvainen lämpötilasta, joten lämpötilan muuttuessa tilavuuskin muuttuu. Jotta laiva-automaation tietokone pystyisi laskemaan lämpötilakorjatun täyttöasteen tankkitaulukosta saatujen pisteiden perusteella, tarvitaan tieto pinnankorkeuden lisäksi lämpötilasta. Jokaiselle tankille on annettu tiheys manuaalisesti. Laiva-automaatio saa myös tiedon tankin lämpötilasta, jota mitataan yleensä Pt100 tyyppisellä anturilla. Näillä tiedoilla laiva-automaation tietokone laskee lämpötilakorjatun täyttöasteen sinne syötetyn kaavan avulla. Yhtälö (8) on esimerkki kaavasta, jota käytetään polttoainetankeissa tiheyden lämpötilakorjaukseen. Mikäli laiva-automaation tietokone on ohjelmoitu korjaamaan tiheyttä kaavan (8) mukaan, on tiheys ilmoitettava 15 °C lämpötilassa. (Tamminen 2015.)

$$\rho = \rho_{15^{\circ}\text{C}} * \{1 - [(T - 15) * 0,00064]\} \quad (8)$$

jossa	$\rho$	lämpötila korjattu tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$\rho_{15^{\circ}\text{C}}$	tiheys 15 °C:ssa	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$T$	nesteen lämpötila	[°C]

Lämpötilakorjauksessa tulee ottaa huomioon myös tarkkuus, jolla lämpötila saadaan määritetyksi. Lämpötila-anturit ovat käytännössä niin tarkkoja, että anturin tarkkuudella ei ole juurikaan merkitystä. Sen sijaan anturin sijainti tankissa saattaa vaikuttaa suuresti mittaustulokseen. Suurella lämmityksessä raskasöljyvarastotankissa lämpötilat tankin sisällä saattavat vaihdella suuresti. Esimerkiksi tilanteessa, jossa anturi on sijoitettu lähelle lämmityskierukoita, saadaan liian suuri lämpötila. (Pohjola 2015.)



### 7.5.3 Trimmi ja kallistuskorjaus

Laivaympäristössä ei aina ole mahdollista päästä ihannetilanteeseen, jolloin laiva olisi tasakölillä ja suorassa. Aluksen trimmiin ja kallistukseen vaikuttavat mm. alustyypin, lastin, meri- ja tuuliolosuhteet. Laiva-automaatio saa tiedon aluksen keula- ja peräsyväyksistä sekä kallistuksesta. Usein aluksen syväystiedot saadaan samanlaisella hydrostaattisenpaineen menetelmällä, jota käytetään tankkien pinnanmittauksissa. Kallistuksen määrittämiseen käytetään inklinometriä. Trimmi- ja kallistustiedot lähetetään yhdessä pinnanmittausjärjestelmästä tulleiden tankkien korkeusarvojen kanssa sarjaliikenteellä laivan automaatiojärjestelmästä lastitietokoneelle. Lastitietokone lähettää tankkitilavuudet takaisin laiva-automaatioon trimmi- ja kallistuskorjattuina. Edellä mainittujen aluksen asennon tiedonkeräämismenetelmien kohdalla voidaan miettiä niistä aiheutuvia virheitä. (Pohjola 2015.)

Suurin epävarmuustekijä määritettäessä tankin täyttöastetta, kun alus ei ole tasakölillä tai suorassa, on tarkkuus, jolla kuplailuputken alapään, paineanturin tai tutkan sijainti saadaan määritettyä aluksen x, y, z koordinaatistossa. Koska tämä sijainti mitataan manuaalisesti, syntyy lähes aina hieman virhettä. Varsinainen virhe syntyy, kun näiden koordinaattien perusteella luodaan tankkitaulukko kyseiselle mittausmenetelmälle. Tästä johtuva virhe saattaa olla hyvinkin suuri riippuen aluksen asennosta sekä koordinaattien määrittämisessä syntyneestä virheestä. (Pohjola 2015.)

### 7.5.4 Tankin geometria

Kuten taulukon 2 kuvaajasta voimme havaita aluksilla olevat tankit eivät aina ole suorakaiteen muotoisia, jolloin kuvaaja olisi suora. Esimerkiksi laitatankeissa on usein mukana kaarevia muotoja, jolloin kuvaajakin saa kaarevia muotoja. Kaarevia muotoja omaavissa tankeissa, syntyy virhettä täyttöasteilla, joilla laiva-automaation tietokoneelle syötettyjen pisteiden väliset suorat eivät täysin noudata tankin kuvaajaa. Virhe on kuitenkin hyvin pieni, mutta virheiden kumuloituessa sillä on hieman merkitystä. (Pohjola 2015.)

## 8 PINNANMITTAUSJÄRJESTELMILLÄ SAAVUTETTAVA TARKKUUS

Tässä luvussa suoritetaan virhetarkastelu elektro-pneumaattiselle pinnanmittausjärjestelmälle. Virhetarkastelun avulla on tarkoitus selvittää suurin mahdollinen tarkkuus,

jolla pinnankorkeus voidaan mitata optimaalisessa käyttöönottilanteessa. Virhetarkasteluun valitaan tilanne, jossa alus on tasakölillä ja suorassa. Edellisestä kappaleesta valitaan virhetekijät, jotka aiheuttavat edellä mainitussa tilanteessa epävarmuutta, sekä arvioidaan niiden suuruus.

### 8.1 Offset

Käytetään offsetin lyhenteenä  $T_0$ :aa ja virheen lyhenteenä offsetissa  $\Delta T_0$ :aa. Kuplailuputken offset on yleisesti luokkaa 100 mm. Koska offset mitataan mittanauhaa käyttäen, on tuloksessa aina virhettä. Arvioiduksi tarkkuudeksi, jolla mittaus pitää pystyä suorittamaan, valitaan viisi millimetriä, eli  $\Delta T_0 = 5 \text{ mm}$ .

### 8.2 Anturin ja järjestelmän virhe

Anturin virhe sisältyy järjestelmän virheeseen, johon kuuluu myös kuplailuputken painehäviöiden aiheuttama virhe, joka pyritään huomioimaan järjestelmän kalibroinnissa. Järjestelmästä johtuvien virheiden lyhenteenä käytetään  $\Delta p$ :tä. Esimerkiksi Scanjet Macron ilmoittaa järjestelmän tarkkuudeksi 0,25 % koko mittausalueella. Käytetään laskuissa arvoa  $\Delta p = 0,25 \%$ .

### 8.3 Tiheys

Polttoaineen toimittaja ilmoittaa tiheyden tarkkuudella, jolla ei virheen kannalta ole merkitystä. Tarkasteluun otetaan mukaan lämpötilan vaikutus tiheyteen. Kappaleessa seitsemän todettiin, että tankin lämpötila saattaa vaihdella tankin sisällä. Merkitään lämpötilan mittauksesta tulevaa virhettä  $\Delta T$ :llä. Valitaan lämpötilan vaihteluista aiheutuvaksi virheeksi  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ :ta molempiin suuntiin, eli  $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Koska lämpöantureiden sisäiset virheet ovat häviävän pieniä ja jouduimme arvioimaan lämpötilanvaihtelun tankin sisällä, voidaan anturin aiheuttaman virheen ajatella sisältyvän tähän.

Seuraavaksi lasketaan tiheyden virhe kevyelle polttoöljylle lämpötilavaihtelun seurauksena. Kevyen polttoöljyn tiheys  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa on  $835,6 \text{ kg/m}^3$ . Käytetään tiheyden muutoksen määrittämiseen kaavaa kahdeksan.

$$\rho = 835,6 \text{ kg/m}^3 * \{1 - [(20^\circ\text{C} - 15) * 0,00064]\} = 832,93 \text{ kg/m}^3$$

Tiheyden virhe todellisen lämpötilan ollessa 5 °C suurempi kuin mitattu, saadaan vähentämällä lämpötilakorjattu tiheys 15 °C tiheydestä. Kaavalla kahdeksan lasketun tiheyden muutos on sama molempiin suuntiin. Käytetään tiheyden virheestä lyhennettä  $\Delta\rho$ .

$$\Delta\rho = (835,6 - 832,93)kg/m^3 = 2,67kg/m^3$$

Virhetarkastelu suoritetaan kokonaisdifferentiaalin avulla Mathcad-laskentaohjelmaa hyväksikäyttäen. Virhetarkastelu tehdään 50 cm:n ja 150 cm:n todellisilla pinnankorkeuksilla. Hydrostaattisen paineen määrittämiseen eri täyttöasteilla tulee huomioida 100 mm:n offset.

Paine paineanturilla 50 cm pinnankorkeudella on:

$$p_{40} = 835,6kg/m^3 * 9,81m/s^2 * (0,5m - 0,1m) = 3278,9Pa$$

Paine paineanturilla 150cm pinnankorkeudella on:

$$p_{150} = 835,6kg/m^3 * 9,81m/s^2 * (150m - 0,1m) = 11476,1Pa$$

Edellä määritettyjen epävarmuustekijöiden lisäksi Maan vetovoiman kiihtyvyydessä olevana epävarmuutena käytetään arvoa 0.001 m/s<sup>2</sup>.

Lähtöarvot 50 cm:n pinnankorkeudella:

$$p := 3278.89Pa \quad \rho := 835.6 \frac{kg}{m^3} \quad g := 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$T_0 := 100mm$$

Määritetään pinnankorkeus lähtöarvojen funktiona:

$$h(p, \rho, g, T_0) := \frac{p}{\rho \cdot g} + T_0 \quad h(p, \rho, g, T_0) = 0.5m$$

Syötetään muuttujien epävarmuudet:

$$\Delta p := p \cdot 0.25\% = 8.197Pa \quad \Delta \rho := 2.7 \frac{kg}{m^3} \quad \Delta g := 0.001 \frac{m}{s^2}$$

$$\Delta T_0 := 5mm$$

Syötetään summalauseke, jossa funktio derivoidaan erikseen jokaisen muuttujan suhteen ja derivaatan itseisarvo kerrotaan muuttujan epävarmuudella:

$$\Delta h := \left| \frac{d}{dp} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta p + \left| \frac{d}{d\rho} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta \rho + \left| \frac{d}{dg} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta g \dots \\ + \left| \frac{d}{dT_0} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta T_0$$

$$\Delta h = 7.333 \cdot \text{mm}$$

Syötetään lauseke suhteellisen epävarmuuden määrittämiseksi:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} := \frac{\Delta h}{h(p, \rho, g, T_0)} \quad \varepsilon = 1.467 \cdot \%$$

Suhteelliseksi epävarmuudeksi 50 cm:n pinnankorkeudella saadaan noin 1.5 %.

Eri suureiden vaikutus suhteelliseen epävarmuuteen:

$$\left| \frac{d}{dp} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta p = 1 \cdot \text{mm} \quad \left| \frac{d}{d\rho} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta \rho = 1.292 \cdot \text{mm} \\ \left| \frac{d}{dg} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta g = 0.041 \cdot \text{mm} \quad \left| \frac{d}{dT_0} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta T_0 = 5 \cdot \text{mm} \\ \frac{\Delta p}{p} = 0.25 \cdot \% \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = 0.323 \cdot \% \quad \frac{\Delta g}{g} = 0.01 \cdot \% \quad \frac{\Delta T_0}{T_0} = 5 \cdot \%$$

Lähtöarvot 150 cm:n pinnankorkeudella:

$$p := 11476.1 \text{ Pa} \quad \rho := 835.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \underline{\underline{g}} := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$T_0 := 100 \text{ mm}$$

Määritetään pinnankorkeus lähtöarvojen funktiona:

$$h(p, \rho, g, T_0) := \frac{p}{\rho \cdot g} + T_0 \quad h(p, \rho, g, T_0) = 1.5 \text{ m}$$

Syötetään muuttujien epävarmuudet:

$$\Delta p := p \cdot 0.25\% = 28.69 \text{ Pa} \quad \Delta \rho := 2.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \Delta g := 0.001 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\Delta T_0 := 5 \text{ mm}$$

Syötetään summalauseke, jossa funktio derivoidaan erikseen jokaisen muuttujan suhteen ja derivaatan itseisarvo kerrotaan muuttujan epävarmuudella:

$$\Delta h := \left| \frac{d}{dp} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta p + \left| \frac{d}{d\rho} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta \rho + \left| \frac{d}{dg} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta g \dots \\ + \left| \frac{d}{dT_0} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta T_0$$

$$\Delta h = 13.166 \cdot \text{mm}$$

Syötetään lauseke suhteellisen epävarmuuden määrittämiseksi:

$$\epsilon_w := \frac{\Delta h}{h(p, \rho, g, T_0)} \quad \epsilon = 0.878\%$$

Suhteelliseksi epävarmuudeksi 150 cm:n pinnankorkeudella saadaan noin 0.9 %.

Eri suureiden vaikutus suhteelliseen epävarmuuteen:

$$\left| \frac{d}{dp} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta p = 3.5 \cdot \text{mm} \quad \left| \frac{d}{d\rho} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta \rho = 4.524 \cdot \text{mm} \\ \left| \frac{d}{dg} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta g = 0.143 \cdot \text{mm} \quad \left| \frac{d}{dT_0} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta T_0 = 5 \cdot \text{mm} \\ \frac{\Delta p}{p} = 0.25\% \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = 0.323\% \quad \frac{\Delta g}{g} = 0.01\% \quad \frac{\Delta T_0}{T_0} = 5\%$$

Lasketuista tuloksista voimme todeta, että edes parhaimmassa mahdollisessa tilanteessa epävarmuudessa ei päästä pienillä pinnan korkeuksilla alle 1.5 %:n ja suuremmilla pinnankorkeuksilla alle 1 %:n. Kun otetaan mukaan tankissa olevan nesteen tilavuuden laskenta laiva-automaatiossa, tulee mukaan lisää epävarmuustekijöitä, jolloin suhteellinen epävarmuus tilavuudessa on suurempi kuin pinnankorkeudessa. Aluksen ollessa trimmissä tai kallistuneena ja tankin geometria hankala, tulee myös pinnankorkeuden määrittämisessä mukaan lisää epävarmuustekijöitä ja suhteellinen epävarmuus kasvaa entisestään. Lisäksi on otettava huomioon epävarmuustekijät mittaustavassa, johon pinnanmittausjärjestelmän tulosta verrataan.

Vertailun vuoksi lasketaan vielä suhteellinen epävarmuus suuremmilla epävarmuustekijöillä, jotta voimme verrata ja nähdä miten eri epävarmuustekijät ja niiden suuruus

vaikuttavat pinnanmittauksen tarkkuuteen. Otetaan tilanne, jossa kuplailuputken asentajalle tulee 10 mm virhe offsetin mittaamisessa. Lisäksi tankin pohja sattuu olemaan kuplailuputken kohdalta 10 mm lommolla terästöiden seurauksena. Näiden seurauksena  $\Delta T_0 = 20$  mm. Nesteen lämpötilan määrittämisessä tulee 10 °C:een virhe. Tiheyden laskennallinen muutos lämpötilan muuttuessa 10 °C:tta käyttäen kaavaa (8) on:

$$\rho = 835,6 \text{ kg/m}^3 * \{1 - [(25^\circ\text{C} - 15) * 0,00064]\} = 830.25 \text{ kg/m}^3$$

Joten 10 °C:een virheellä lämpötilan mittauksessa  $\Delta\rho$  on:

$$\Delta\rho = (835,6 - 830.25) \text{ kg/m}^3 = 5.3 \text{ kg/m}^3$$

Näiden virheiden lisäksi paineanturin kalibroinnissa tulleen virheen ja ilmapuotojen, sekä ilmaputken painehäviöiden seurauksena hydrostaattisen paineen mittauksessa tulee yhden prosentin virhe. Maanvetovoiman kiihtyvyydessä käytetään epävarmuutena samaa 0.001 m/s<sup>2</sup> arvoa.

Nyt lasketaan suhteellinen virhe 50 cm ja 150 cm pinnankorkeuksilla kuten edellä, mutta suuremmilla epävarmuustekijöillä:

Lähtöarvot 50 cm:n pinnankorkeudella:

$$p := 3278.89 \text{ Pa} \quad \rho := 835.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$T_0 := 100 \text{ mm}$$

Määritetään pinnankorkeus lähtöarvojen funktiona:

$$h(p, \rho, g, T_0) := \frac{p}{\rho \cdot g} + T_0 \quad h(p, \rho, g, T_0) = 0.5 \text{ m}$$

Syötetään muuttujien epävarmuudet:

$$\Delta p := p \cdot 1\% = 32.789 \text{ Pa} \quad \Delta \rho := 5.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \Delta g := 0.001 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\Delta T_0 := 20 \text{ mm}$$

Syötetään summalauseke, jossa funktio derivoidaan erikseen jokaisen muuttujan suhteen ja derivaatan itseisarvo kerrotaan muuttujan epävarmuudella:

$$\Delta h := \left| \frac{d}{dp} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta p + \left| \frac{d}{d\rho} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta \rho + \left| \frac{d}{dg} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta g \dots \\ + \left| \frac{d}{dT_0} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta T_0$$

$$\Delta h = 26.578 \cdot \text{mm}$$

Syötetään lauseke suhteellisen epävarmuuden määrittämiseksi:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} := \frac{\Delta h}{h(p, \rho, g, T_0)} \quad \varepsilon = 5.316 \cdot \%$$

Suhteelliseksi epävarmuudeksi 50 cm:n pinnankorkeudella saadaan noin 5.3 %.

Eri suureiden vaikutus suhteelliseen epävarmuuteen:

$$\left| \frac{d}{dp} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta p = 4 \cdot \text{mm} \quad \left| \frac{d}{d\rho} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta \rho = 2.537 \cdot \text{mm} \\ \left| \frac{d}{dg} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta g = 0.041 \cdot \text{mm} \quad \left| \frac{d}{dT_0} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta T_0 = 20 \cdot \text{mm} \\ \frac{\Delta p}{p} = 1 \cdot \% \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = 0.634 \cdot \% \quad \frac{\Delta g}{g} = 0.01 \cdot \% \quad \frac{\Delta T_0}{T_0} = 20 \cdot \%$$

Lähtöarvot 150 cm:n pinnankorkeudella:

$$p := 11476.1 \text{ Pa} \quad \rho := 835.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$T_0 := 100 \text{ mm}$$

Määritetään pinnankorkeus lähtöarvojen funktiona:

$$h(p, \rho, g, T_0) := \frac{p}{\rho \cdot g} + T_0 \quad h(p, \rho, g, T_0) = 1.5 \text{ m}$$

Syötetään muuttujien epävarmuudet:

$$\Delta p := p \cdot 1\% = 114.761 \text{ Pa} \quad \Delta \rho := 5.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \Delta g := 0.001 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\Delta T_0 := 20 \text{ mm}$$

Syötetään summalauseke, jossa funktio derivoidaan erikseen jokaisen muuttujan suhteen ja derivaatan itseisarvo kerrotaan muuttujan epävarmuudella:

$$\Delta h := \left| \frac{d}{dp} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta p + \left| \frac{d}{d\rho} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta \rho + \left| \frac{d}{dg} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta g \dots \\ + \left| \frac{d}{dT_0} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta T_0$$

$$\Delta h = 43.022 \cdot \text{mm}$$

Syötetään lauseke suhteellisen epävarmuuden määrittämiseksi:

$$\varepsilon_w := \frac{\Delta h}{h(p, \rho, g, T_0)} \quad \varepsilon = 2.868 \cdot \%$$

Suhteelliseksi epävarmuudeksi 150 cm:n pinnankorkeudella saadaan noin 2.9 %.

Eri suureiden vaikutus suhteelliseen epävarmuuteen:

$$\left| \frac{d}{dp} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta p = 14 \cdot \text{mm} \quad \left| \frac{d}{d\rho} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta \rho = 8.88 \cdot \text{mm} \\ \left| \frac{d}{dg} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta g = 0.143 \cdot \text{mm} \quad \left| \frac{d}{dT_0} h(p, \rho, g, T_0) \right| \cdot \Delta T_0 = 20 \cdot \text{mm} \\ \frac{\Delta p}{p} = 1 \cdot \% \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = 0.634 \cdot \% \quad \frac{\Delta g}{g} = 0.01 \cdot \% \quad \frac{\Delta T_0}{T_0} = 20 \cdot \%$$

Nyt voimme havaita, että suhteellinen virhe 50 cm pinnankorkeudella kasvoi jo yli viiteen prosenttiin. Eniten epävarmuutta aiheuttaa offsetin mittauksesta johtuva epävarmuus. Tuloksista voimme myös päätellä, että paineen mittauksen epävarmuuden ja lämpötilan mittauksen epävarmuudella on suuri vaikutus suhteelliseen virheeseen, ja että niiden vaikutus kasvaa suuremmilla pinnankorkeuksilla entisestään.

## 9 DIAGNOSTIIKKA KÄYTTÖNOTON YHTEYDESSÄ

Hydrostaattisen paineen mittaamiseen perustuvien pinnanmittausjärjestelmien käytön yhteydessä järjestelmän laskemaa tilavuutta verrataan manuaalisen mittauksen ja tankkitaulukon osoittamaan tilavuuteen. Telakan standardi on pyrkiä vähintään



viiden prosentin tarkkuuteen tilavuudessa. Käyttöänoton yhteydessä virhettä on kuitenkin usein yli tavoitellun viiden prosentin, jolloin virheen aiheuttaja(t) on pyrittävä löytämään. (Pohjola 2015.)

Tässä luvussa selvitetään menetelmät virheen aiheuttajan paikantamiseen ja luodaan vika-syy- korjaustaulukko (liite 1) helpottamaan virheen etsimistä ja korjaamista elektro-pneumaattiseen pinnanmittaukseen perustuvasta järjestelmästä. Taulukko luodaan listaamalla virheen aiheuttajat ja korjaavat toimenpiteet. Lisäksi mietitään kysymykset virheiden erikoispiirteiden tunnistamiseen, joiden avulla voidaan rajata virheen aiheuttajajoukko pienemmäksi.

Virheen aiheuttajaa voidaan pitää jonkinlaisena vikana järjestelmässä, joten virheen aiheuttajan paikallistamiseen voidaan käyttää apuna erilaisia vian hakemismenetelmiä. Vian hakumenetelmien avulla vika pyritään rajaamaan aina yhä pienemmälle alueelle, kunnes se lopulta löydetään. Erilaisia vian hakemismenetelmiä ovat mm. tulosta lähtöön -menetelmä, lähdöstä tuloon -menetelmä, satunnaismenetelmä ja puolitusmenetelmä. (Heinonkoski 2013, 39.)

### 9.1 Tulosta lähtöön -menetelmä

Tässä menetelmässä, jota kutsutaan myös alusta loppuun menetelmäksi, verrataan sisään tulon ja lähdön arvoja keskenään. Arvoja vertaamalla voidaan päätellä laitteen toimintaa. (Heinonkoski 2013, 39.)

### 9.2 Lähdöstä tuloon -menetelmä

Lähdöstä tuloon -menetelmä toimii kuten tulosta lähtöön -menetelmäkin. Koska tässä menetelmässä vika arvioidaan laitteen toiminnan tuloksena saatavan arvon tai signaalin perusteella, on laitteiston syy- ja seuraussuhteet tunnettava paremmin. Vikaantuesaan laite muuttaa toimintapistettään, joten oikeat arvot on tiedettävä ja arvoja verrattava keskenään. (Heinonkoski 2013, 39.)

### 9.3 Satunnaismenetelmä

Satunnaismenetelmä on hyvä, kun laitteiston rakenne on epäselvä. Satunnaismenetelmällä laitteistoa koetetaan satunnaisista kohdista, jonka perusteella vikakohde rajataan. (Heinonkoski 2013, 39.)

### 9.4 Puolitusmenetelmä

Puolitusmenetelmässä järjestelmä jaetaan puoliksi ja järjestelmän antamia signaaleita tai arvoja mitataan tulosta lähtöön -menetelmällä puolivälissä, ja tällöin voidaan päätellä kummalla puolella vika on. Puolitus menetelmä on tehokas tapa rajata vika pienemmälle alueelle varsinkin, kun järjestelmä on rakennettu moduuleista tai, jos laitteisto on monimutkainen. (Heinonkoski 2013, 39-40.) Esimerkiksi virheen etsimisessä laiva-automaatiosta saadun ja manuaalisesti todetun tilavuuden välillä, voidaan järjestelmä puolittaa pinnanmittausjärjestelmän ja laiva-automaation väliltä. Mikäli pinnanmittausjärjestelmästä ja manuaalisesti saadut pinnan korkeudet ovat samat, voidaan vian todeta olevan laiva-automaation puolella.

## 10 LOPPUPÄÄTELMÄT

Opinnäytetyön aiheena pinnanmittausjärjestelmien tutkiminen oli mielenkiintoista ja tutkittavaa varmasti riittää jatkossakin. Tutkimuksen tuloksena saatiin kattava selvitys pinnanmittausjärjestelmien toimintaperiaatteista ja lista pinnanmittausjärjestelmien virheiden aiheuttajista, sekä niiden vaikutukset ja ominaispiirteet pinnanmittauksen tarkkuuteen. Selvitettyjen virheiden aiheuttajien perusteella luotiin liitteenä oleva taulukko virheen etsintään. Virheiden aiheuttajien ominaispiirteiden perusteella, sekä käyttämällä vian hakumenetelmiä voidaan mahdollinen virheen aiheuttaja löytää nopeasti.

Opinnäytetyön alkuperäiseen suunnitelmaan sisältyi kysely laitevalmistajille, jolla haettiin laitevalmistajien näkemystä virhetekijöihin ja miten virhetekijät saataisiin minimoitua. Laitevalmistajien vastaukset kysymyksiin olivat kuitenkin opinnäytetyön kannalta hyödyttömiä. Aikaa uudelle kyselylle ei opinnäytetyön aikataulutuksen vuoksi ollut, joten virhetekijät kartoitettiin ainoastaan haastatteleamalla Arctech oy:n suunnittelu- ja käyttöönotto-osaston henkilökuntaa, millä päästiin mielestäni hyviin tuloksiin.

Selvitettyjen virhetekijöiden perusteella tehtiin virhetarkastelu käyttäen kokonaisdifferentiaalia. Virhetarkastelulla todettiin, että pienillä pinnankorkeuksilla alle 1.5 %:n ja suuremmilla pinnankorkeuksilla alle 1 %:n suhteelliseen virheeseen parhaimmassa mahdollisessa tilanteessakaan ei päästä johtuen epävarmuustekijöistä. Virhetarkastelulla todettiin myös, että virheen kasvaessa lämpötilan mittauksessa 10 °C:seen, offsetin mittauksessa 20 mm:iin sekä järjestelmän virheen kasvaessa yhteen prosenttiin kasvaa suhteellinen epävarmuus matalilla pinnan korkeuksilla jo yli viiteen prosenttiin.

Kun virheiden aiheuttajat ja niiden suhteellinen vaikutus pinnanmittausjärjestelmän tarkkuuteen tunnetaan, voidaan niihin kiinnittää suurempaa huomiota suunnittelu ja asennusvaiheessa, jolloin virhe saadaan minimoitua. Suunnitteluvaiheessa on erittäin tärkeää huomioida lämpötila-anturin sijainti, jotta mitattu lämpötila olisi mahdollisimman lähellä todellista. Manuaalipinnanmittausputken, kuplailuputken tai paineanturin sijainnin määrittämiseen on kiinnitettävä huomiota, jolloin tankkitaulukoista saadaan tarkat ja offsetista johtuva virhe minimoitua. Järjestelmästä johtuvan virheen minimoimiseksi pitää elektro-pneumaattisen pinnanmittausjärjestelmän putkisto tarkistaa ilma-  
vuotojen varalta ennen kalibrointia, jonka jälkeen kalibrointi suoritetaan valmistajan ohjeen mukaisesti.

## LÄHTEET

Arctech Oy 2014. Sisäinen tietokanta. Arctech Helsinki Shipyard Oy.

Arctech Oy 2015. Yritys. Arctech Helsinki Shipyard Oy. Saatavissa:  
<http://arctech.fi/fi/about-us/> [viitattu 4 2 2015].

Damcos 2008. Product Data Sheet. Saatavissa:  
<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Marine%20Tank%20Management%20Documents/SD%208615-2E02.pdf> [viitattu 22 4 2015].

Emerson Process Management 2012. Product Data Sheet. Saatavissa:  
<http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CEMQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww2.emersonprocess.com%2Fsiteadmincenter%2FPM%2520Marine%2520Tank%2520Management%2520Documents%2FSD%25208601-2E04%2520MAS%25202600.pdf&ei=V1PrVLiBMYGeygOyxIDABQ&>  
[viitattu 23 2 2015].

Heinonkoski, R. 2013. Kone- ja prosessiautomaation kunnossapito. Helsinki: Opetushallitus.

Juhani Suokari Oy 2011. Saatavissa: <http://www.jsoy.fi/uploads/images/mitta.jpg>  
[viitattu 26 01 2015].

Liquid Level Systems 2009. Tank Contents Gauges. Saatavissa:  
<http://www.liquidlevelsystems.com/uploads/downloads/tank-contents-gauges/600-data-sheet.pdf> [viitattu 14 4 2015].

Oy Meyer vastus Ab, Tuotteet. Saatavissa:  
<http://www.meyervastus.fi/?p=products&cat=19&id=78> [viitattu 18 4 2015].

Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. 2. Painos. Helsinki: Opetushallitus.

Pohjola, M.-L. 2015. Senior Designer, Ship Theory & Weight, Projects and Project Desing. Arctech Oy. Haastattelu. 16.4.2015. Helsinki.

Rauhala, H. 2015. Foreman, Machinery Outfitting. Arctech Oy. Haastattelu. 26.2.2015. Helsinki.

Rauniomaa, J. 2015. Designer, Machinery Systems. Arctech Oy. Haastattelu 21.4.2015. Helsinki.

Scanjet Macron Intl. Ltd. 2009. Electro-pneumatic tank level gauging and traft measuring system Functional & Technical description.

Scanjet Macron Intl. Ltd. 2011. Electro-pneumatic tank level gauging and draft measuring system installation manual.

Scanjet 2014, Tank Management system. Saatavissa:

[http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CDQQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.scanjetariston.no%2Ffilemanager%2Fdownload\\_file%2Ffile%2F589048.pdf%2F28150.pdf&ei=Sg\\_uVOCWJePgywOa9oDQCQ&usg=AFQjCNGdGOCU8QMrrZGcJ7vEoflwbYMiXg&bvm=bv.869564](http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CDQQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.scanjetariston.no%2Ffilemanager%2Fdownload_file%2Ffile%2F589048.pdf%2F28150.pdf&ei=Sg_uVOCWJePgywOa9oDQCQ&usg=AFQjCNGdGOCU8QMrrZGcJ7vEoflwbYMiXg&bvm=bv.869564)

[viitattu 25 2 2015].

SKS Sensors, Miten pt100 anturi toimii. Saatavissa:

<http://www.skssensors.fi/faq/miten-pt100-anturi-toimii/> [viitattu 13 5 2015].

Suvanto, K. 2012. Tekniikan fysiikka 1. 1.-5. painos. Porvoo: Edita Publishing Oy.

Tamminen, J. 2015. Automation Designer, Electrical Systems. Arctech Oy. Haastattelu 16.4.2015. Helsinki.

Thermibel, Pt100. Saatavissa: <http://www.thermibel.be/documents/pt100/pt100-connection.xml?lang=en>

[viitattu 18 4 2015].

<p>Huom!</p> <p>Jos manuaalisessa pinnanmittauksessa on eroa pinnanmittausjärjestelmän ilmoittamaan pinnan korkeuteen, tarkista ensiksi taulukon kohdat 1-5</p> <p>Jos suhteellinen virhe on selvästi suurempi pienillä täyttöasteilla, tarkista ensiksi kohdat 4, 8, 9, 10 ja 11.</p> <p>Jos alus on trimmissä tai kallistunut, tarkista ensiksi kohta 7.</p>				
Vika	Milloin	Syy	Korjaus	
Virhe tilavuudessa käytettäessä elektro-pneumaattista pinnanmittausta	Aina	1	Painehäviöt ilmaputkessa	Tarkista onko putkistossa ilmavuotoja ja kalibroij järjestelmä.
		2	Anturivika	Tarkista anturin toiminta ja tarvittaessa vaihda.
		3	Väärä tiheys	Tarkista pinnanmittausjärjestelmälle syötetty tiheys ja tarvittaessa syötä uusi tiheys.
		4	Kuplailuputken offset	Tarkista kuplailuputken offset, tarvittaessa syötä uusi offset järjestelmään.
		5	Tiheyden lämpötilakorjaus	Tarkista lämpötila-anturin toiminta ja arvioi lämpötilan paikkansapitävyys. (anturin sijainti)
		6	Tankin geometria	Tarkista seuraako tankkitaulukosta syötettyjen pisteiden väliset suorat tankin kuvaajaa riittävän tarkasti.
		7	Kallistus- ja trimmikorjaus	Tarkista vastaako järjestelmän kallistus- ja trimmitieto todellista.  Varmista, että tankkitaulukko on luotu oikealla kuplailuputken sijainnilla tankissa. (x, y ja z koordinaatit)
	Verattaessa manuaaliseen pinnanmittaukseen	8	Lukuvirhe manuaalipinnanmittauksessa	Suorita manuaalinen pinnanmittaus huolellisesti. (useampi mitta)
		9	Manuaalipinnanmittausputken sijainti	tarkista manuaalisen pinnanmittausputken offset, sekä sijainti tankissa. (x, y ja z koordinaatit)
		10	Manuaalipinnanmittausputki on mitattu väärin	Mikäli manuaalipinnanmittausputki ei ole suora, tarkista että putken pituus ja mutkat ovat mitattu oikein.

	Verattaessa virtausmittarin lukemaan	11	Teräsvähennys	Varmista teräsvähennyksen paikkansapitävyys, jos tankissa kulkee putkia tai tankin tilavuuteen vaikuttaa jokin muu tekijä.
		12	Virhe virtausmittarin lukemassa	Varmista että virtausmittari on kalibroitu ja toimii oikein.