

Konsta Heino

**VEDESSÄ KULKEVAN AALLON MALLINTAMINEN
SENSORIDATALLA**

Kandidaatintyö

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Veli-Pekka Pyrhönen
Maaliskuu 2021

TIIVISTELMÄ

Konsta Heino: Vedessä kulkevan aallon mallintaminen sensoridatalla

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta

Maaliskuu 2021

Tässä työssä tutkitaan tapoja mallintaa vedessä kulkeva aalto, aaltopojussa olevilla sensoreilla. Aallon mallintamiseksi esitellään lineaarinen aaltoteoria ja sensorit, joiden mit-taustuloksista voidaan johtaa aallon parametrit. Sensorien esittelyn jälkeen tutkimusta-paukseen sovelletaan sensorifuusiota Kalman suotimella sensoreiden mittaustuloksien tarkkuuden parantamiseksi. Menetelmien ja sensorien tarkkuutta arvioidaan Simulink-mallinnuksella ja testeillä. Lopuksi tulokset käydään läpi ja arvioidaan työn tavoitteen onnistumista.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatin työ käsittelee aallon mallintamista aaltopöijussa olevilla sensoreilla. Työ on tehty koneella, ja tulokset perustuvat Simulinkissä tehtyihin testeihin. Työssä siis ei ole rakennettu toimivaa aaltopöijua, jota olisi testattu luonnon olosuhteissa.

Kiitän työni tarkastajaa Veli-Pekka Pyrhöstä kaikesta työn tekemisen aikana antamastaan avusta ja kärsivällisyydestä. Varsinkin tällaisena erityisenä aikana, jolloin globaali pandemia loi ylimäärästä kiirettä sekä hänelle, minulle, että koko yliopisto yhteisölle.

Tampereella, 15.3.2021

Päivittäjä

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO	IV
1 JOHDANTO	2
2 AALLON KÄYTTÄYTYMISESTÄ.....	4
2.1 Aallon ominaisuuksista	4
2.2 Refraktio ja diffraktio	6
3 LINEAARINEN AALTOTEORIA	9
3.1 Kaavat	9
3.2 Aallonnopeus ja aallonpituus	10
3.3 Aallon energia ja teho	11
4 AALLON MALLINTAMINEN POIJUN SENSOREILLA.....	13
4.1 Aallonkorkeuden mittaaminen.....	13
4.1.1 Aallonkorkeus barometrilla	13
4.1.2 Kiihtyvyyssanturi ja A/D-muunnin.....	16
4.1.3 A/D-muuntimesta kiihtyvyyteen	17
4.1.4 Aallonkorkeuden johtaminen kiihtyvyydestä	18
4.2 Aallonpituus, -periodi, -nopeus, energiatiheys ja tehoteiheys.....	19
5 SENSORIFUUSIO	21
5.1 Sensorifuusio.....	21
5.2 Tilamalli ja Kalman suodin	22
6 SENSORIEN VERTAILU.....	25
6.1 Sensorit	25
6.2 Testit.....	26
7 PÄÄTELMÄT.....	29
7.1 Johtopäätökset	29
LÄHTEET	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>A/D-muunnin</i>	<i>Analog to Digital taajuusmuunnin</i>
<i>c</i>	<i>aallon nopeus</i>
<i>H</i>	<i>aallon korkeus</i>
<i>L</i>	<i>aallon pituus</i>
<i>x</i>	<i>aallon leveys</i>
<i>A</i>	<i>aallon pinta-ala</i>
θ	<i>aallon suunta</i>
<i>T</i>	<i>aallon periodi</i>
<i>f</i>	<i>aallon taajuus</i>
<i>PE</i>	<i>aallon potentiaalienergia</i>
<i>pe</i>	<i>aallon potentiaalienergia pinta-alaa kohden</i>
<i>KE</i>	<i>aallon kineettinen energia</i>
<i>ke</i>	<i>aallon kineettinen energia pinta-alaa kohden</i>
<i>e</i>	<i>aallon kokonaisenergia pinta-alaa kohden eli energiatiheys</i>
<i>p</i>	<i>aallon tehotiheys</i>
ρ	<i>ilman tiheys</i>
<i>P</i>	<i>ilmanpaine</i>
<i>h</i>	<i>veden syvyys</i>
<i>g</i>	<i>painovoima</i>
π	<i>pi</i>
V_{ref}	<i>AD-muuntimen muunninkohtainen referenssijännite</i>
<i>B</i>	<i>AD-muuntimen resoluutio</i>
Ad_{Rx}	<i>AD-muuntimesta saatu bittinen jännite</i>
<i>E</i>	<i>Virhe</i>
<i>MAE</i>	<i>Virheen absoluuttinen keskiarvo</i>
<i>RMSE</i>	<i>Virheen neliöllinen keskiarvo</i>

1 JOHDANTO

Vesistöjen pinnat ovat harvoin täysin tyyniä. Aaltoja esiintyy vesistöissä jonkin nesteeseen vaikuttavan voiman seurauksena. Nämä voimat vaikuttavat pintajännitystä ja maan vetovoimaa vastaan, jotka puolestaan yrittävät pitää veden pinnan tasaisena. Kun voima kuten tuuli tai putoavan kivi kohdistuu nesteeseen, painovoima ja pintajännitys toimivat tavalla, joka muistuttaa lankaan kohdistuvaa jännitettä, muodostaen aallon.

Aaltojen koko ja muoto vaihtelevat riippuen nesteeseen vaikuttavan voiman suuruudesta. Aaltojen koot vaihtelevat hyvin pienistä aalloista valtaviin, koko maapalloa kiertäviin aaltoihin, eli vuorovesiin. Kuun, ja muiden astronomisten kappaleiden, painovoiman vaikutus aiheuttaa vuorovesien synnyn. Vuorovesiä on helppo ennustaa, sillä taivaankappaleiden liikeradat tiedetään ja niistä aiheutuva nesteeseen vaikuttava voima osataan laskea. Muita tavallisia aaltojen aiheuttajia ovat tuuli, ja jonkin kappaleen aiheuttama veden syrjäytyminen.

Aallon koon ennustaminen ja laskemien helpottuu muutamalla oletuksella. Vedenpohja on täysin tasaisen, nesteeseen ei kohdistu useita voimia, eikä nesteeseen kohdistuvan voiman suuruus vaihtelee ennustamattomasti. Tällaiseen asetelmaan on tosielämässä mahdotonta päästä. Luonnossa veden pinnalla kulkeva aalto on usein monen aallon summa. Sen lisäksi aallon muotoon vaikuttavat meren topografia, merivirrat, ilman ja veden lämpötila ja muita satunnaisuuksia.

Ensimmäiset sensoreihin perustuvat tavat mallintaa aaltoa ja merta kehitettiin 60 -luvuilla. [2, s. 1], [1] Nämä järjestelmät olivat: aaltopoiju ja tuulen nopeuteen perustuva meren mallinnus. Ensimmäinen versio aaltopoijusta kehitettiin 1953 Alankomaissa tapahtuneen Pohjanmeren tulvan takia. Tuolloin vesi ylitti tulvapadot ja 2000 ihmistä kuoli tulvien seurauksena. Alankomaiden tulvapatojen läheisyydessä kelluu nykyisin keltaisia aaltopoijuja, jotta samanlainen katastrofi voidaan välttää. Aalto-poijun etuna voi pitää mittaustulosten paikallista tarkkuutta.

Pierson ja Moskovizin [6] kehittämän täysin kehittyneiden tuuli-aaltojen teorian tarkoitus oli mallintaa merta laajemmalla alueella. Tämä teoria on sittemmin todistettu epätarkaksi, mutta se toimi pohjana modernien merenpinnan topografiaa mittaavien teknologioiden ja teorioiden synnyssä.

Nykyään aallon ominaisuuksien arvioimiseen, ja meren mallintamiseen on olemassa useita menetelmiä. Koko maapallon mittakaavassa tuulia ja aaltoja voidaan tarkkailla satelliitteihin ja lentokoneisiin kiinnitetyillä tutkilla.

Meren tilaa voidaan myös ennustaa spektri-evoluutio-malleilla, jotka mahdollistavat maailmanlaajuiset tuulien ja aaltojen sääennusteet. Paikallisesti tarkinta tietoa aaltojen ominaisuuksista saadaan kuitenkin aaltopoijuista. Modernin aaltopoijun mittaus on tarkimmillaan vain alle 0.5% päässä aallon oikeasta koosta [9].

Aallon muodon laskemiseen tarvittava informaatio saadaan poijuissa olevien sensorien kautta. Maailmalla aaltopoijuja käytetään esimerkiksi sään ennustamiseen, aaltojen aiheuttaman eroosion arvioimiseen ja tsunami- ja tulvahälytysjärjestelmissä. Poijuista saatavaa tietoa aaltojen kineettisistä ja dynaamisista ominaisuuksista tarvitaan myös rannikoille ja veteen sijoittuvien rakennuksien suojausta suunniteltaessa.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan aallon käyttäytymistä ja tapoja mallintaa aaltoja aaltopoijuissa olevien sensorien avulla. Työ tehdään lähtökohtana projektille, jonka tarkoituksena on rakentaa toimiva aaltopoiju lähelle rannikkoa.

Johdannon jälkeen toisessa luvussa tarkastellaan aallon käyttäytymistä avomerellä ja rannikon läheisyydessä, jotta käytettävät kaavat ja sensorit voidaan valita. Kolmannessa luvussa esitellään lineaarinen aaltoteoria ja kaavoja aallon ominaisuuksien laskemiseen. Seuraavaksi neljännessä luvussa tutkitaan vaihtoehtoja sensoreille ja aallon parametrien laskemista poijun sensoreista tuotettavalla datalla. Viidennessä luvussa simuloidaan aaltopoijusta saatavaa dataa ja arvioidaan neljännessä kappaleessa esiteltyjen menetelmien tarkkuutta. Kuudennessa kappaleessa esitetään työn johtopäätökset.

2 AALLON KÄYTTÄYTYMISESTÄ

Projektin aaltopoiju on tarkoitus rakentaa lähelle rannikkoa, joten on olennaista tarkastella aallon käyttäytymistä matalassa vedessä lähellä rantaa. Aaltopoijun mitaamat olennaiset parametrit ovat korkeus, pituus, nopeus, periodi ja energia. Ei ole olemassa sensoreja, jotka voisivat suoraan mitata näitä suureita, joten ne on laskettava valittujen sensorien datasta. Aallon käyttäytymistä on ymmärrettävä, jotta sensorien mittausdataa voidaan käyttää aallon parametrien laskemiseen.

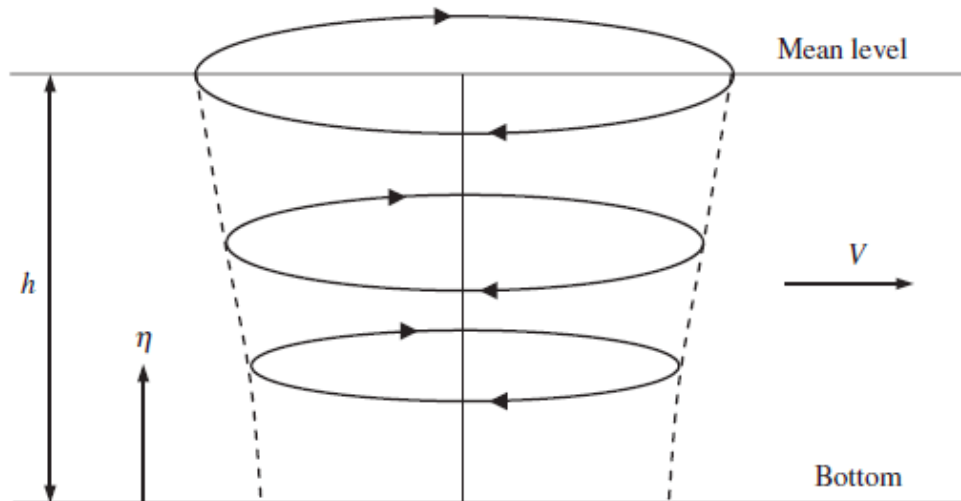
Tässä kappaleessa käydään läpi aallon peruskäyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa. Kuvaillaan ympäristön vaikutusta aaltojen suuntaan, ja selitetään tekstissä usein esiintyviä termejä.

2.1 Aallon ominaisuuksista

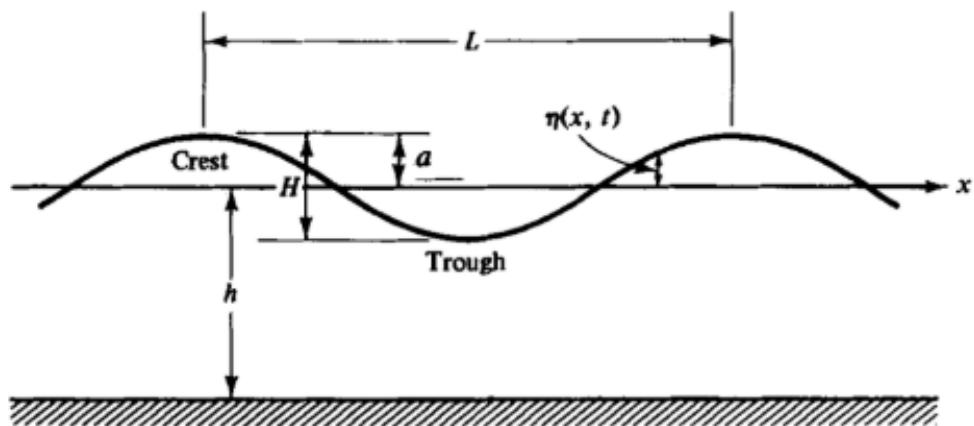
Jotta sensoreista saatavaa tietoa voitaisiin käyttää hyväksi, on ymmärrettävä perusasioita aallon ominaisuuksista. Tärkeimmät parametrit aallon mallintamiseen ovat aallon pituus, korkeus ja veden syvyys. Kaikki muut aallon ominaisuudet, kuten nopeus, periodi ja energia, voidaan laskea teoreettisesti näistä parametreista. Aaltopoijun on pystyttävä laskemaan johdannossa mainitut parametrit tietämättä veden syvyyttä, joten projektissa se pyritään välttämään.

Vedessä kulkeva aalto käyttäytyy samalla tavalla kuin missä tahansa muualla luonnossa esiintyvät aallot. Aallon perusominaisuuksiin kuuluvat refraktio, heijastus, interferenssi ja diffraktio. [8]

Aalto kulkee nesteen pinnalla eteenpäin. Vesi ei kuitenkaan virtaa aallon mukana. Sen sijaan vesipartikkelit kulkevat paikallaan elliptisellä radalla. Vesipartikkeleiden radat on esitetty kuvassa 1.



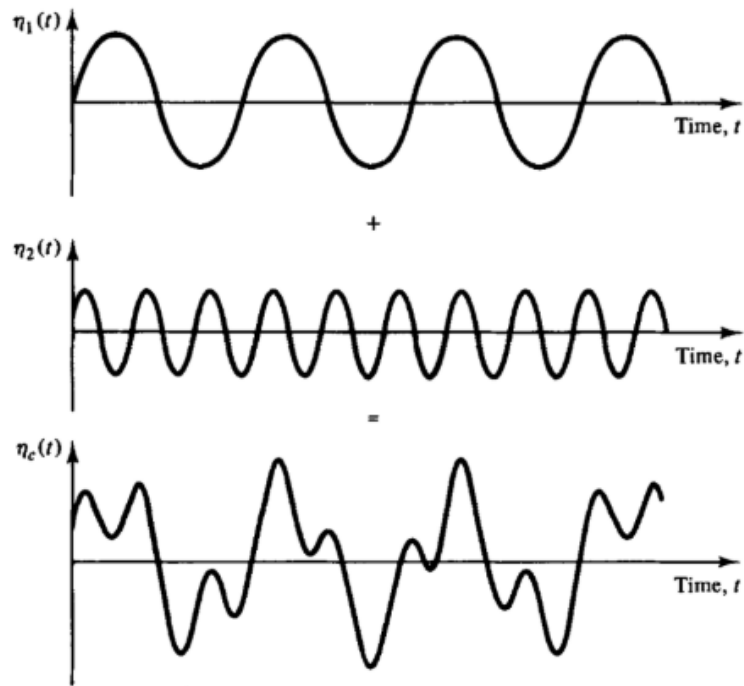
Kuva 1 vesipartikkeleiden radat aallokossa [7]



Kuva 2 Aallon ominaisuuksia [7]

Kuvassa 1 on 2-ulotteisesti havainnollistettu yhden aallon liikettä suuntaan x . Aallon pituus L on matka kahden aallonharjan (crest) välillä ja h on veden syvyys. Aallon korkeus on kuvassa H . [7, s. 3] Yksittäinen vedessä kulkeva aalto muistuttaa siniaaltoa lyhyen matkan aikana.

Luonnolle alttiissa, varsinkin suurissa vesistöissä pelkästään yhdestä aallosta muodostuvaa aallokkoa voidaan pitää mahdottomana. Aalloille ominaisen interferenssin takia aallokkoa voidaan tarkastella useiden ja eri suuntiin kulkevien siniaaltojen kertaumana. Kuvassa 2 on havainnollistettu kahden aallon summa.



Kuva 3 Kahden siniaallon summa [7]

Avomerellä aallon suuntaa on vaikea mallintaa, sillä eri suuntiin kulkevia aaltoja on paljon. Avomerellä kelluvasta aaltopöijusta saatavan datan perusteella on vaikeaa määrittää vallitsevan aallokon suuntaa ja muotoa. Aallokko käyttäytyy kuitenkin vähemmän kaottisesti tietyissä tapauksissa. Pierson ja Moskoviz [6] esittävät, että suurissa ja matalassa vedessä kulkevia aaltoja voi mallintaa siniaaltoina, kunhan aallot ovat niin sanottuja täysin kehittyneitä aaltoja. Täysin kehittyneen aallon nopeus on lähes sama kuin vallitseva tuulennopeus.

Matalassakin vedessä on useampi kuin yksi siniaalto eri aallon vaiheessa. Yhden siniaallon käyttäminen mallinnukseen on kuitenkin todistettu olevan tarpeeksi tarkkaa tiettyihin tarpeisiin, kuten aallokon suurimman aallon ominaisuuksien laskemiseen [7, s. 4]. Tämän tarkkuuden takia aaltojen ominaisuuksien laskemiseen käytetään usein lineaarista aaltoteoriaa, toiselta nimeltään Airyn aaltoteoriaa. Lineaarisen aaltoteorian periaatteita käydään tarkemmin läpi luvussa 3.

2.2 Refraktio ja diffraktio

Vedessä kulkevalla aallolla on samat ominaisuudet kuin millä tahansa aallolla. Saaristossa ja rannan läheisyydessä erityisesti refraktio ja diffraktio vaikuttavat aallon suuntaan. Aallon suunta muuttuu pohjan muodon vaihdellessa matalassa vedessä ja aallon

kohdatessa esteitä. Lyhyesti diffraktio tarkoittaa aallon muodon ja suunnan muuttumista sen kohdatessa esteitä ja refraktio aallon taittumista syvyyden vaihdellessa.

Refraktio aiheuttaa eri suunnista rantaa lähestyvien aaltojen taittumista rantaa kohti. Aaltojen edetessä kohti rantaa jostain suunnasta osa aallonharjasta kulkee lähempänä rantaa. Taittumista tapahtuu, kun aalto kohtaa syvyyden muutoksen. Tässä tapauksessa osa aallosta, joka on matalammassa vedessä, alkaa hidastua. Tämän seurauksena aallonharja muuttaa suuntaansa. Aallon taittumista näkee käytännössä kuvasta 4. Kuvassa refraktiota ja diffraktiota tapahtuu samanaikaisesti.

Refraktio ei tarkoita, että aalto kulkisi täydellisen kohtisuorasti rannan suuntaan. Silti refraktio helpottaa rannan läheisyydessä olevan aaltopöijun rakentamista. Rannan läheisyydessä suuntaa ei tarvitse aina laskea refraktion takia.



Kuva 4 Aallot taittuvat munakarim ympärillä Yyterissä

Kun syvyys muuttuu aallon edetessä vedessä, suorille ja yhdensuuntaisille korkeuskäyrille pätee Snellin laki

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}. \quad (2.1)$$

Jos aallon suunta θ_1 , nopeus ennen refraktiota C_1 ja refraktion jälkeen C_2 tiedetään, voidaan laskea aallon suunta refraktion jälkeen θ_2 [3, s. 71]. Snellin lakia on käytettävä, jos aallokkoa halutaan mallintaa laajemmin. Paikallisen aallon muotoja laskettaessa aaltopojilla siitä ei ole hyötyä.

Syvyyden muutokset eivät käytännössä ole koskaan yhdensuuntaisia tai suoria. Refraktio voidaan silti laskea säteenjäljityksen menetelmällä. Snellin lakia käytetään jokaisessa korkeuskäyrän ylityksessä, eli syvyyden muutoksen kohdassa, erikseen olettaen, että jokaisessa kohdassa korkeuskäyrät ovat suoria ja yhdensuuntaisia. Tällä tavalla aaltosäde voidaan piirtää avomereltä rannalle käänteisesti. Säteenjäljityksen menetelmiä ei käydä yksityiskohtaisemmin läpi tässä kandidaatintyössä.

3 LINEAARINEN AALTOTEORIA

Tässä kandidaatintyössä aallon mallintamiseksi on pääasiassa käytetty apuna lineaarista aaltoteoriaa. Lineaarinen aaltoteoria on kokoelma tapoja mallintaa aaltoja eri syvyyksissä yksinkertaistamalla tiettyjä nesteen ominaisuuksia. Lineaarisen aaltoteorian hyöty on juuri sen yksinkertaisuus ja helppokäyttöisyys. Se ei kuvaa aaltoja täydellisesti vaan on approksimaatio aaltojen ominaisuuksista tietyissä olosuhteissa.

Yksinkertaistettua eli siniaaltona kuvattua aaltoa kutsutaan tämän takia lineaariseksi aalloksi. George B Airy [10] esitti ensimmäisen lineaarisen teorian aallosta jo vuonna 1884. Kappaleessa 3.1 ei johdeta lineaarisen aaltoteorian perusfunktioita. Perusfunktiot käydään läpi, jotta voidaan ymmärtää, miten niitä on sovellettu sensoridatan käsittelyyn.

Epälineaarinen aaltoteoria ei ole oma teoriansa. Tässä työssä sitä käytetään käsitteenä, joka kokoaa yhteen tapoja mallintaa epälineaarisia aaltoja ja aallokkoa eri olosuhteissa. Epälineaariset teoriat eivät tee oletuksia nesteestä, vaan pyrkivät mallintamaan aallokkoa ja aaltoja mahdollisimman tarkasti. Epälineaariset teoriat ovat yleensä matemaattisesti haastavia. Sen takia ne eivät ole yleisiä aaltodatan mittaamiseen merellä suuren laskentatehon tarpeen vuoksi.

3.1 Kaavat

Lineaarinen aaltoteoria on lineaarinen kuvaus aaltojen etenemisestä homogeenisessä nesteessä. Teoriaa käytettäessä on tehtävä muutama oletus nesteestä. Oletetaan, että nesteellä on yhdenmukainen syvyys kaikkialla, ja että neste on ideaalista. Ideaalinen neste on ominaisuuksiltaan viskoositonta ja kokoon puristumatonta.

Teoria ei ota huomioon painovoiman aiheuttamaa Coriolis-ilmiötä eikä veden pyörteisyyttä. Viimeiseksi oletetaan, että aallon amplitudi on verrattain pieni aallon pituuteen nähden [7, s. 6]. Teoria toimii aaltoihin matalassa ja syvässä vedessä, mutta sillä ei voi mallintaa murtuvia aaltoja. Lineaarinen aaltoteoria soveltuu parhaiten yksittäisen aallon tarkasteluun.

3.2 Aallonnopeus ja aallonpituus

Lineaarisen aaltoteorian perusfunktioita käytettäessä on otettava huomioon aallonpituuden L suhde veden syvyyteen h (Kuva 1). Aallon ominaisuuksia lasketaan eri lausekkeilla tästä suhteesta riippuen. Jos veden syvyys on murto-osa aallonpituudesta

$$h < \frac{L}{20}. \quad (3.1)$$

Voidaan veden nopeus c

$$c = \sqrt{gh}, \quad (3.2)$$

ja aallonpituus L

$$L = T\sqrt{gh} \quad (3.3)$$

laskea [7, s. 15]. Matalassa vedessä kaavat 3.2 ja 3.3 voivat olla epätarkkoja sillä lineaarinen aaltoteoria ei sovellu tarkasti rikkoutuviin aaltoihin ja vaahtopäihin.

Kaavoista huomataan, että pienillä veden syvyyksillä nopeus c riippuu pelkästään painovoimasta g ja veden syvyydestä h . Aallonpituus L riippuu näiden kahden arvon lisäksi aallon periodista T . Syvyydellä on vaikutus näihin parametreihin myös keskisyvässä vedessä. Keskisyvän veden kaavoja

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad \text{ja} \quad (3.4)$$

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (3.5)$$

käytetään, jos aallonpituuden ja syvyyden suhde on

$$\frac{L}{20} < h < \frac{L}{2}. \quad (3.6)$$

Lisäksi lineaarinen aaltoteoria määrittää vielä kaavat syvälle vedelle,

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad \text{ja} \quad (3.7)$$

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2. \quad (3.8)$$

Näitä kaavoja käytetään, kun syvyys on suurempi kuin puolet aallonpituudesta

$$h > \frac{L}{2}. \quad (3.9)$$

[7, s. 15] [11, kappale 1.3]

Kappaleessa 4 aallon nopeuden c ja aallonpituuden L laskemiseen on käytetty kaavoja 3.8 ja 3.9. Näitä kaavoja käytetään, koska syvyyttä ei tarvitse tietää niiden käyttämiseen, ja kaava 3.7 toteutuu realistisesti kaikkialla mihin aaltopöjju olisi järkevää sijoittaa.

3.3 Aallon energia ja teho

Aallolla on nopeutta ja korkeutta, joten sillä on myös oltava potentiaali- ja kineettistä energiaa. Täten aallon kokonaisenergia on näiden summa. Potentiaalienergia on seuraus aallon korkeudesta H suhteessa y -akseliin (Kuva 1) Kanoğlu et al [15, kappale 9] esittävät potentiaalienergian PE kuten kaavassa

$$PE = \frac{1}{4} \rho H^2 x L g. \quad (3.10)$$

Missä ρ on ilmanpaine, H on aallonkorkeus, L on aallonpituus, g on painovoiman aiheuttama kiihtyvyyys ja x on kaksiulotteisen aallon leveys. Potentiaalienergia pinta-alaa kohden pe saadaan jakamalla kaava 3.10 pinta-alalla $A = xL$

$$pe = \frac{1}{4} \rho \left(\frac{H}{2}\right)^2 g. \quad (3.11)$$

Yhden aallon kineettinen energia on energia yhden aallonpituuden L alueelta [Lamb, katso 15 kappale 9]. Kineettisen energian KE kaava on muodoltaan sama kuin potentiaalienergian

$$KE = \frac{1}{4} \rho \left(\frac{H}{2}\right)^2 x L g. \quad (3.12)$$

Kineettinen energia pinta-alaa kohden ke saadaan myös jakamalla aallon energia pinta-alalla

$$ke = \frac{1}{4} \rho \left(\frac{H}{2}\right)^2 g. \quad (3.13)$$

Aallon kokonaisenergian pinta-alaa kohden, eli energiatiheys tai energiavuo e on potentiaali- ja kineettisen energian summa

$$e = p_e + k_e = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{H}{2}\right)^2 g. \quad (3.14)$$

Kaavasta 3.14 aallon tehosiheys p saadaan kertomalla yhtälö aallon taajuudella f

$$p = \frac{1}{2}f\rho\left(\frac{H}{2}\right)^2 g = \frac{1}{2T}\rho\left(\frac{H}{2}\right)^2 g. \quad (3.15)$$

Taajuus f on aallon periodin T käänteisluku

$$f = \frac{1}{T}. \quad (3.16)$$

4 AALLON MALLINTAMINEN POIJUN SENSO- REILLA

Sensoreiden mittaustuloksilla pitää pystyä laskemaan aallon korkeutta, pituutta, nopeutta, periodia ja energiaa. Suureet johdetaan laskukaavoilla, jotka perustuvat lineaariseen aaltoteoriaan ja matemaattisiin kaavoihin. L

Sensorien tuottamista mittaustuloksista korkeusarvoja voidaan laskea eritavoin. Kappaleessa nämä tavat esitellään ja arvioidaan sanallisesti.

4.1 Aallonkorkeuden mittaaminen

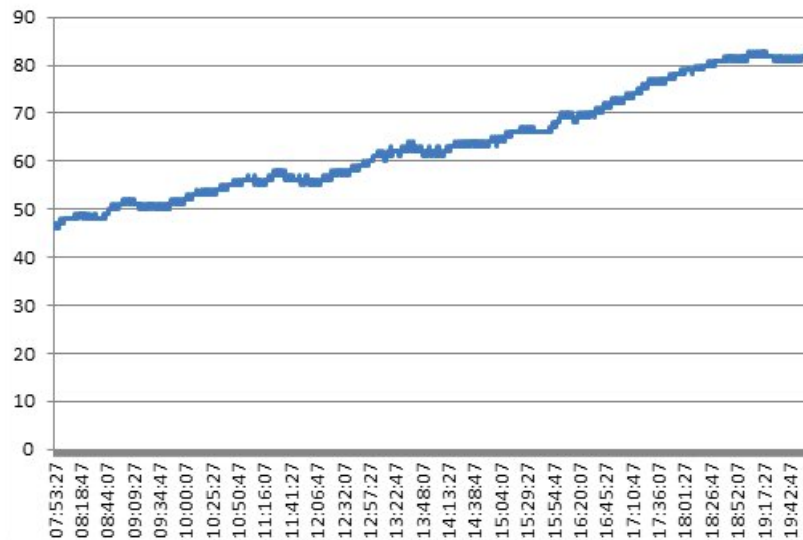
Korkeutta mittaava teknologia perustuu usein ilmanpaineen muutoksen laskemiseen. Korkeuden muutosta voi tämän lisäksi laskea myös gyroskoopilla ka korkeusmetrillä eli korkeusanturilla. Työssä on käyty läpi muutoksen laskeminen barometrillä ja kiihtyvyyssanturilla, korkeusanturia ei käydä läpi sillä siitä korkeus saadaan suoraan ulos. Menetelmät esitellään tässä kappaleessa.

Korkeutta laskiessa on otettava huomioon veden pinnan nousu ja lasku. Veden korkeuteen vaikuttavat vuorovesi, virtaukset, kuivuus, sateen määrä ja muut sääolosuhteet. Pojjun on osattava laskea aallon korkeus sen hetkiseen vedenpinnan korkeuteen suhteutettuna. Lineaarisen aaltoteorian mukaan aallokkoa voi pitää jatkuvana sinifunktiona. Jos aallokko oletetaan tasaiseksi sinifunktioksi voi aallon korkeuden laskea laskemalla sensorin korkeutta tietyllä aikavälillä.

4.1.1 Aallonkorkeus barometrillä

Barometri mittaa vallitsevaa painetta. Pojjun liikkuessa aallonharjan ja aallonpohjan välillä ilmanpaineessa tapahtuu pieniä muutoksia. Koska vedenpinnan korkeus vaihtelee ja ilmanpaine riippuu säästä, korkeutta ei voi johtaa olettamalla, että ilmanpaine on aina sama tietyssä korkeudessa. Hyvä puoli barometrissa on helppo tapa laskea korkeuden muutosta. Riippuen barometrillä korkeuden muutoksen tarkkuus voi kuitenkin kärsiä liian pienessä aallokossa.

Kuvassa 5 barometrilla on mitattu ilmanpainetta ja korkeutta laskettu jatkuvasti ajan kuluessa. Kuvasta huomataan, että sensorin mukaan korkeus on muuttunut, vaikka todellisuudessa se on pysynyt samana. Ilmanpaineeseen ovat vaikuttaneet vain sääolosuhteet. Barometri oli sijoitettu maalle eikä se ollut liikkeessä.



Kuva 5 Korkeus laskettuna barometrillä ajan suhteen. Oikea korkeus on 47.5 metriä. [20]

Aallon korkeuden laskemiseksi barometrilla barometri kalibroidaan ilmanpaineen arvoon levossa olevan merenpinnan tasalla. Levossa olevan merenpinnan korkeus määritetään nollaan metriin. Tätä voidaan myöhemmin käyttää hyväksi sääolosuhteiden ja sensorin epätarkkuuden virheen korjauksessa.

Ilmanpaineen muutosta poijun liikkeessä on laskettava tarpeeksi lyhyen ajan suhteen, jotta sääolosuhteiden muutoksen merkitys ilmanpaineeseen voidaan minimoida. Ilmanpaineen vertailuarvoksi olisi hyvä määrittää uusi arvo ainakin 10 minuutin välein kuvan 5 perusteella. Ideaalisessa tapauksessa ilmanpaineen vertailuarvo voidaan vaihtaa läheisen sääaseman mittaamaan ilmanpaineen arvoon. Sääaseman mittaama ilmanpaine pitää kuitenkin suhteuttaa merenpinnan korkeuteen.

Toinen vaihtoehto virheen korjaamiseksi on korkeuden minimi- ja maksimiarvojen seuraaminen. Linearisessa aaltoteoriassa aalto kuvataan siniaaltona eli aallon minimi- ja maksimiarvojen summan pitäisi olla nolla, jos kuvitellaan että levossa merenpinnan korkeus on 0 metriä. Virheen kasvaessa muutos nolasta kasvaa. Kun aallon minimi- ja maksimiarvojen summa on tarpeeksi kaukana nolasta

$$H_{mid} = H_{hi} + H_{low} \neq 0, \quad (4.1)$$

voidaan keskikohta H_{mid} suhteuttaa takaisin noltaan laskemalla ilmanpaine P korkeudella H_{mid}

$$P = -\rho g H_{mid}. \quad (4.2)$$

Saatu ilmanpaineen arvo merkataan ilmanpaineen arvoksi merenpinnan tasalla eli nollassa metrissä. Sitä voidaan sitten käyttää ilmanpaineen referenssiarvona korkeuden muutoksen laskemiseen kaavalla 4.4.

Kaava 4.4 on johdettu ilmanpaineen ja korkeuden muutoksen suhteesta

$$\frac{dP}{dH} = -\rho g. \quad (4.3)$$

Kaavassa ρ on ilman tiheys ja g painovoima. Kaavaa voidaan käyttää koska voidaan olettaa, että ilman tiheys ei muutu pienillä korkeuden muutoksilla. Kaavan avulla voidaan laskea korkeuden muutos, kun tiedetään ilmanpaine kahdella eri korkeudella

$$\Delta H = \frac{P_1}{-\rho g} - \frac{P_2}{-\rho g}. \quad (4.4)$$

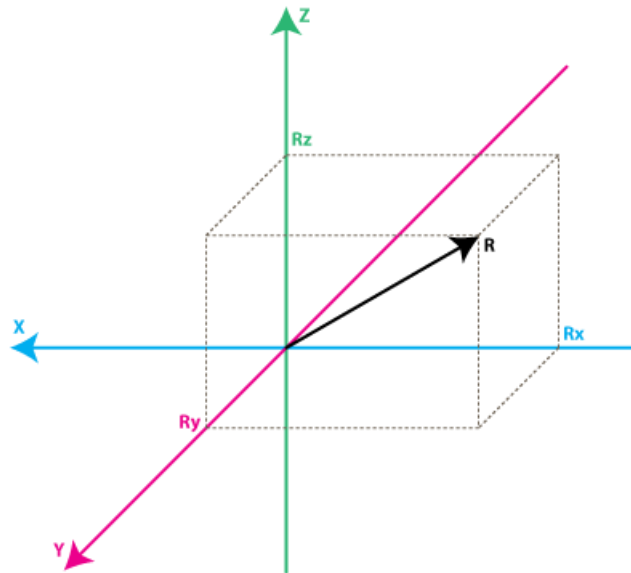
Kaavassa P_1 on paine hetkellä 1 ja P_2 on paine hetkellä 2. Aalto voidaan mallintaa, Kun kaavalla 4.4 lasketaan korkeuden muutosta ajan kuluessa

$$\sum_{n=0}^k H_{t_{n+1}} = \frac{P_n}{-\rho g} - \frac{P_{n+1}}{-\rho g}. \quad (4.5)$$

Jotta kaavan 4.5 jatkuva funktio kuvaisi tarkasti aaltoa on barometrin näytteenottotaajuuden f_s oltava minimissään kaksinkertainen verrattuna aallon taajuuteen [12]. Näytteenottotaajuus f_s on paineiden P_N ja P_{N+1} mittauksen välillä kulunut aika. Kuten mainittu, barometrin on oltava todella tarkka, koska korkeuden vaihdellella näin pieniä määriä paineen muutos on vain muutamia *Pascaleita*.

4.1.2 Kiihtyvyyssanturi ja A/D-muunnin

Kiihtyvyyssanturi mittaa sensoriin kohdistuvaa voimaa. Tämä voima ilmaistaan yleensä suhteessa painovoimaan g . Kiihtyvyyssanturi antaa lukeman nolla vain täysin painottomassa tilassa. Maan painovoiman vaikutuksessa ja olettaen, että muita voimia ei kohdistu anturiin lukema on $1g$ eli $9.81 \frac{m}{s^2}$ [4].



Kuva 6 Kiihtyvyyssanturiin kohdistuva voima graafisesti [4]

Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate on yksinkertainen. Kiihtyvyyssanturi mittaa sensoriin kohdistuvaa voimaa kolmella akselilla (Kuva 6). Kokonaisvoimavektorin R voi laskea voimavektoreista Pythagoraan lauseella

$$R^2 = R_x^2 + R_y^2 + R_z^2. \quad (4.6)$$

Useammat kiihtyvyyssanturit ovat joko analogisia tai digitaalisia. Digitaaliset välittävät tiedon jollain sarjaliikennemenetelmällä kuten I2C, SPI tai USART. Analogiset tuottavat jännitteen ennalta määrättyllä välillä, jonka jälkeen jännite pitää muuttaa tietokoneen käyttämäksi arvoksi eli biteiksi.

Analogisten sensorien kanssa on käytettävä A/D (analog to digital) muunninta. A/D-muuntimia on paljon erilaisia ja kaikkien niiden läpikäyminen ei ole tämän lyhyen esittelyn kannalta järkevää. Yleisimpiä tyyppisiä ovat Flash-muunnin, laskuriperiaatteella tai haarukoimalla toimivat muuntimet, sekä Delta-Sigma- ja SAR-muuntimet. [4]

Analogista sensoria käytettäessä A/D-muuntimen näytteenottotaajuus on oltava ainakin kaksinkertainen verrattuna korkeimman analogisen signaalin taajuuteen, joka halutaan tallentaa. On myös otettava huomioon muuntimen bittisyys eli resoluutio.

Resoluutio on yleensä joko 8, 10, 12, 16 tai 24 bittiä. Resoluutio määrittää kuinka monen osaan mitattu analogijännite voidaan jakaa ja kuinka tarkasti mittaustulos näin ollen saadaan esitettyä. Esimerkiksi 8 bittinen muunnin voi jakaa signaalin 2^8 , eli 256, osaan [5]. Aallon korkeutta mitattaessa muuntimen resoluutiolla ei ole paljon väliä sillä senttien epätarkkuus korkeudessa on epäolennaista.

4.1.3 A/D-muuntimesta kiihtyvyyteen

A/D-muuntimesta saatava analoginen jännitearvo Ad_{Rx} on muunnettava kiihtyvyydeksi. Tämä johdetaan alla. Tulevissa laskuissa muunnosta ei enää tehdä vaan laskuissa oletetaan, että muunnos on jo tehty, tai että käytössä on digitaalinen kiihtyvyyssanturi.

Analogisesta kiihtyvyyssanturista saatu arvo Ad_{Rx} on ensin muunnettava bittisestä arvosta digitaaliseksi

$$V_{Rx} = Ad_{Rx} * \frac{V_{ref}}{2^B - 1}. \quad (4.7)$$

Kaavassa V_{ref} on AD-muuntimen muunninkohtainen referenssijännite ja B on kyseisen muuntimen resoluutio. Kuten mainittu, kiihtyvyyssanturi mittaa maan painovoiman aiheuttamaa voimaa, joten painovoima pitää ottaa huomioon laskuissa. Kiihtyvyyssantureille on aina määritetty V_{ZeroG} -jännitetaso, joka vastaa painovoiman aiheuttamaa jännitettä. Jotta saamme oikean kiihtyvyyssanturin kohdistuneen voiman muutoksen selville, V_{ZeroG} -jännitetaso pitää vähentää saadusta V_{Rx} arvosta

$$\Delta V_{Rx} = V_{Rx} - V_{ZeroG}. \quad (4.8)$$

ΔV_{Rx} on kiihtyvyyden muutosta vastaava arvo voltteina. Muunnos kiihtyvyyteen R_x tapahtuu jakamalla ΔV_{Rx} kiihtyvyyssanturin herkkyydellä S

$$R_x * g = \frac{\Delta V_{Rx}}{S}. \quad (4.9)$$

Tästä saatu arvo on aina suhteutettu painovoimaan g . Kiihtyvyyssanturin herkkyys on määritetty kiihtyvyyssanturin spesifikaatiossa. Yhdistämällä nämä kaavat saamme suoran muunnoksen A/D muuntimen tuottamasta Ad_{Rx} arvosta x-akselille kohdistuvaan kiihtyvyyteen R_x [4]

$$R_x * g = \frac{Ad_{Rx} * \frac{V_{ref}}{2^B - 1} - V_{ZeroG}}{S}. \quad (4.10)$$

4.1.4 Aallonkorkeuden johtaminen kiihtyvyydestä

Aallonkorkeuden laskemiseen kiihtyvyyssanturilla tarvitaan myös gyroskooppi. Gyroskooppiin kiinnitetyn kiihtyvyyssanturin y-akseli on gyroskoopin ansiosta aina vertikaalinen. Tällöin aallonkorkeutta laskettaessa ei kiihtyvyyssanturin arvoista tarvitse huomioida muuta kuin y-akselille kohdistuva kiihtyvyys R_y .

Sensorin liikuessa aallon mukana siirtymä y-akselilla s_y voidaan laskea integroimalla kiihtyvyyden ajansuhteen kahdesti

$$s_y = \iint_{t_0}^{t_1} R_{yt_1} dt. \quad (4.11)$$

Kokonaissiirtymää voidaan seurata, kun kiihtyvyyttä integroidaan jatkuvasti tarpeeksi suurella näytteenottotaajuudella f_s . Näin on mahdollista piirtää poijun liike y-akselilla. Kiihtyvyyden näytteenottotaajuuden on oltava ainakin kaksinkertainen aallon taajuuteen verrattuna kuten todettu kappaleessa 4.1.1. Näytteenottotaajuus on aika kahden mitaustuloksen näytteenottohetken t välillä

$$f_s = t_{n+1} - t_n. \quad (4.12)$$

On myös oltava tapa suodattaa virhe pois laskusta tai ajan myötä siirtymä ei enää vastaa aallon vaihetta. Aalto voidaan mallintaa, jos siirtymää seurataan ajan suhteen

$$\sum_{n=0}^k s_{yt_{n+1}} = \iint_{t_n}^{t_{n+1}} R_{yt_{n+1}} dt. \quad (4.13)$$

Verrattuna aallonkorkeuden määrittämiseen barometrillä kiihtyvyyssanturilla on mahdollista saada tarkempia tuloksia, kunhan virheen vaikutus saadaan poistettua. Huono puoli

on, että kiihtyvyyssanturin datan käsittely vaatii enemmän laskentatehoa kuin barometrin. Tämä voi johtaa suoritustehon heikkenemiseen aaltopojussa, joka saa energiansa yleensä aurinkokennoilla. On mahdollista, että poijun akusta loppuu akku varsinkin, jos aurinko ei sääolosuhteiden tai vuodenajan takia lataa tarpeeksi akkua.

4.2 Aallonpituus, -periodi, -nopeus, energiatiheys ja tehotiheys

Aallon korkeudesta H on mahdollista johtaa aallonpituus L , -periodi T ja -nopeus c . Tässä kappaleessa nämä arvot johdetaan käyttäen hyväksi lineaarisen aaltoteorian kaavoja.

Aallon periodi T on, etenevässä aallokossa, kahden peräkkäisen aallon välinen aika mitattuna paikalla pysyvistä pisteistä. Laskemalla aallon periodin T voimme kaavoja 3.8 ja 3.9 käyttämällä laskea aallon nopeuden c ja -pituuden L .

Esitetty tapa aallon periodin laskemiseksi ei ole täydellinen. Se perustuu lineaariseen aaltoteoriaan ja havaintoihin aaltojen luonteesta. Tällä tavalla lasketun aallon periodin tarkkuutta meressä on vaikea arvioida ilman kokeellisia tuloksia.

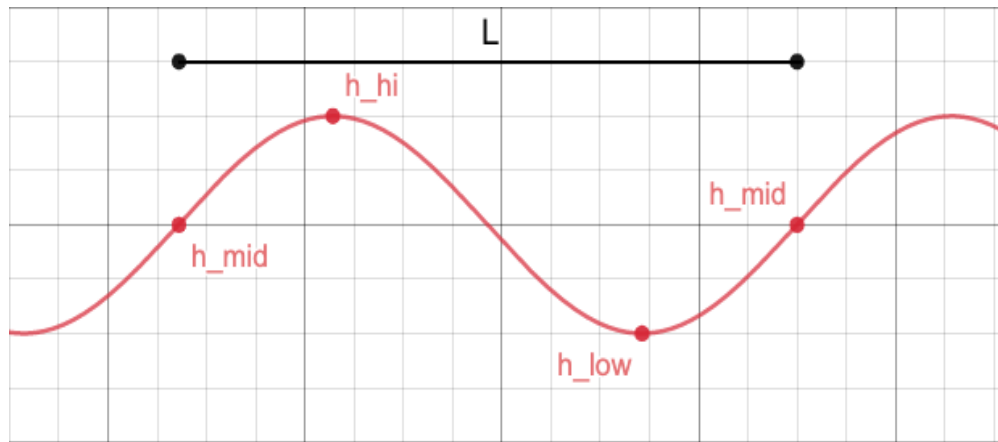
Aallon periodin laskemiseksi on aallosta valittava kiintopiste. Aallon periodin voi laskea ottamalla selvää, kuinka usein aallon mukana liikkuva poiju ohittaa tämän kiintopisteen. Käyttämällä hyväksi lineaarista aaltoteoriaa voimme olettaa aallon siniaalloksi. Useissa tutkimuksissa aallon periodi on laskettu zero up-crossing periodina [13], [14].

Aallon zero up-crossing periodi T_z lasketaan kuluneena aikana aallon keskikohdasta h_{mid} seuraavaan keskikohtaan seuraavilla ehdoilla. Molemmissa keskikohdissa aaltofunktion derivaatta on positiivinen ja keskikohdat sijaitsevat aaltofunktion nollakohdissa, kun aaltofunktio on siirretty x -akselin tasolle (Kuva 7). Nämä ehdot voidaan kirjoittaa kaavaksi

$$\frac{d}{dx}f(x) > 0 \wedge f(0) = 0. \quad (4.14)$$

Zero up-crossing periodi T_z on aika, joka kuluu näiden ehtojen saman-aikaiseen täyttymiseen kahdesti.

Aallon periodin määrittämisen jälkeen aallonnopeus c ja aallonpituus L on helppo määrittää kaavoilla 3.8 ja 3.9. Ideaalisessa tilanteessa aaltopojun algoritmejä voi muuttaa riippuen pohjan syvyydestä. Pohjan syvyydestä riippuen voidaan joko käyttää kaavoja 3.2 ja 3.3 tai 3.5 ja 3.6. Näiden kaavojen käyttämiseksi pohjan syvyys tulee olla tiedossa.



Kuva 7 Aallonpituus L mitattuna aallon keskikohdasta ja aallon zero up-crossing

Kaavojen 3.14 ja 3.15 energia- ja tehoteiheyden määrittämiseen tarvitaan ilmanpaine ρ , aallon periodi T , aallon korkeus H ja painovoiman aiheuttama kiihtyvyys g . Näiden arvojen hankkiminen sensorien ulostuloista on jo määritetty aikaisimmissa kappaleissa, joten energia- ja tehoteiheyks pystytään määrittämään pelkästään kaavoihin sijoittamalla.

5 SENSORIFUUSIO

Poijusta saatavien paikka ja korkeus tietojen täytyvät olla täsmällisiä, jotta aalto voidaan mallintaa tarkasti. Yksittäisistä sensoreista saatavat tulokset voivat olla hyvinkin virheellisiä ja virhemarginaali liian iso pienen aallon korkeuden mittaamiseksi. Virheen pienentämiseksi kaksi tai useampia sensoreita voidaan yhdistää Kalman suotimella. Tätä kutsutaan sensorifuusioksi.[16]

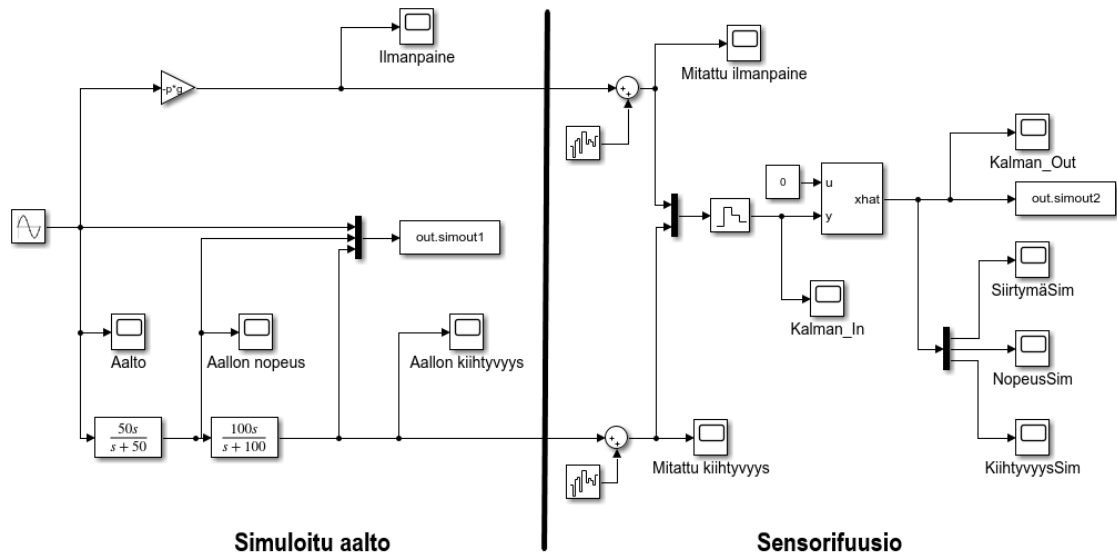
Tässä kappaleessa esitellään työtä varten Simulinkillä mallinnettu aaltopoiju sensoreineen, ja sensorien fuusioiminen Kalman suotimella. Kappaleessa esitellään myös Kalman suotimessa käytetty tilamalli.

Sensorifuusio tehtiin barometrillä ja kiihtyvyyssanturilla, joiden mittaustuloksien käsittely esiteltiin kappaleessa 4. Erilaisia barometrejä ja kiihtyvyyssantureita sovitetaan malliin kappaleessa 6.

5.1 Sensorifuusio

Työssä aalto ja sen parametrien laskenta mallinnettiin Simulinkillä (Kuva 8). Malliin syötetään vasemmalta monimutkainen aaltokuva mallintamaan oikeaa aaltoa. Aallosta lasketaan ilmanpaine ja kiihtyvyys kääntämällä funktioita 4.3 ja 4.11. Kiihtyvyys ja ilmanpaine -signaaleihin syötetään ääntä oikeiden sensorien luoman virheen mukaisesti. Tämän jälkeen signaalit viedään Kalman-suotimeen, joka laskee tarkan estimaatin aallon oikeasta muodosta.

Sensorifuusiolla jokin arvo estimoidaan usean sensorin tuloksen avulla. Estimaatti perustuu siihen, kuinka paljon kuhunkin sensorin arvoon luotetaan. Sensorifuusioon voidaan teoriassa käyttää loputon määrä sensoreita, mutta työn tapauksessa laskentateho ja tila poijun sisällä rajaavat sensorien määrää. Huomasin, että optimaalisin tapa fuusioida sensoreita on käyttää sensoreita, joilla on erilaisia virheitä ja mittaustajuuksia. Tätä havaintoa tukee kappaleessa 6 tehty testi.



Kuva 8 Simulink -mallinnus aallosta ja sensorifuusiosta

5.2 Tilamalli ja Kalman-suodin

Kalman suotimella aallon parametrejä on mahdollista estimoida tarkasti, sensoreiden mittatuloksien ollessa hyvinkin häiriöllisiä. Kalman suodin toimii tuottamalla mittaustuloksille todennäköisyysjakauman, ja palauttaa todennäköisyysjakaumasta todennäköisimmän arvon. Työssä Kalman suodinta käytettiin aallonkorkeuden estimoimiseen. Kiihtyvyyden ja ilmanpainesensorin tulokset syötetään Kalman-suotimeen vektorina,

$$x = [P a]. \quad (5.1)$$

Ulostulona saadaan todennäköisin estimaatti aallonkorkeudesta, -nopeudesta ja -kiihtyvyydestä,

$$y = [h v a], \quad (5.2)$$

Kalman-suotimella sensoreita on mahdollista yhdistää suuri määrä. Poijun sisässä sensoreille ei kuitenkaan ole rajattomasti resursseja, kuten laskentatehoa, energiaa ja tilaa. Työn mallissa käytettiin kahden tai useamman sensorin mittauksia estimoimaan kolmea poijun tilaa: korkeutta, nopeutta, ja kiihtyvyyttä.

Tilamallina käytettiin tasaisen kiihtyvyyden liikemallia (A-matriisi) kaava 5.3 [17]. A, B, C ja D, matriisit esitettynä alla:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & h & \frac{h^2}{2} \\ 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

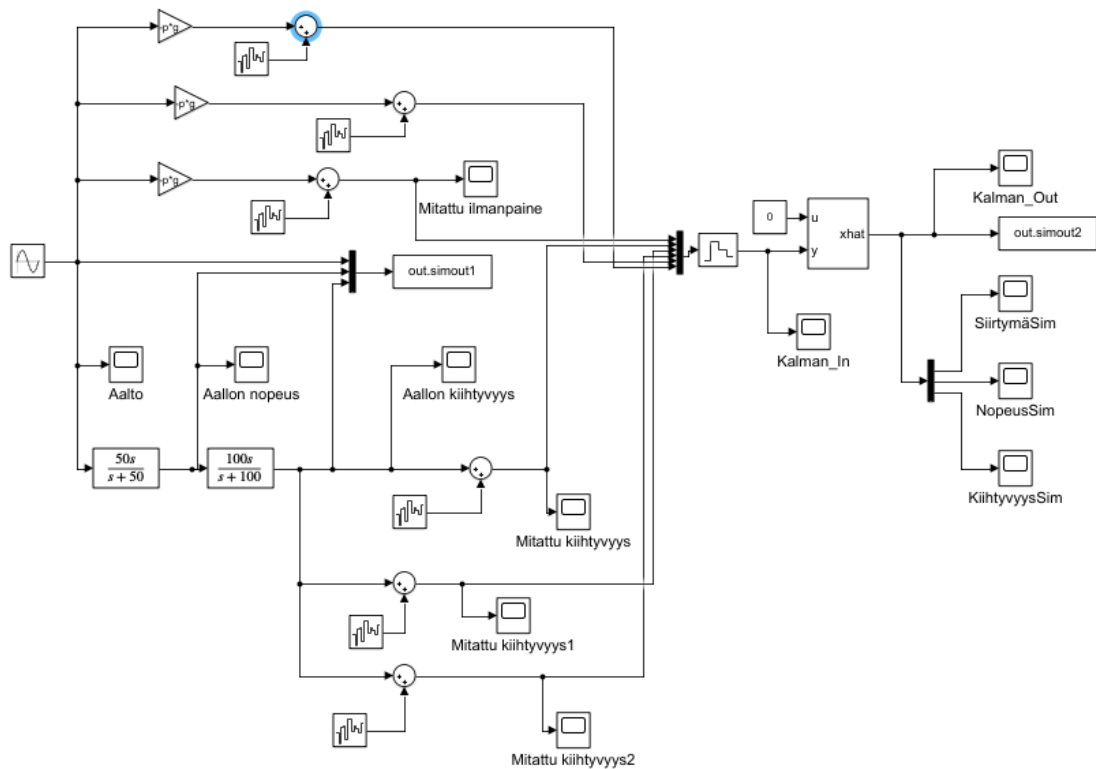
$$B = [0 ; 0 ; 0], \quad (5.4)$$

$$C = [-p * g \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 1], \quad (5.5)$$

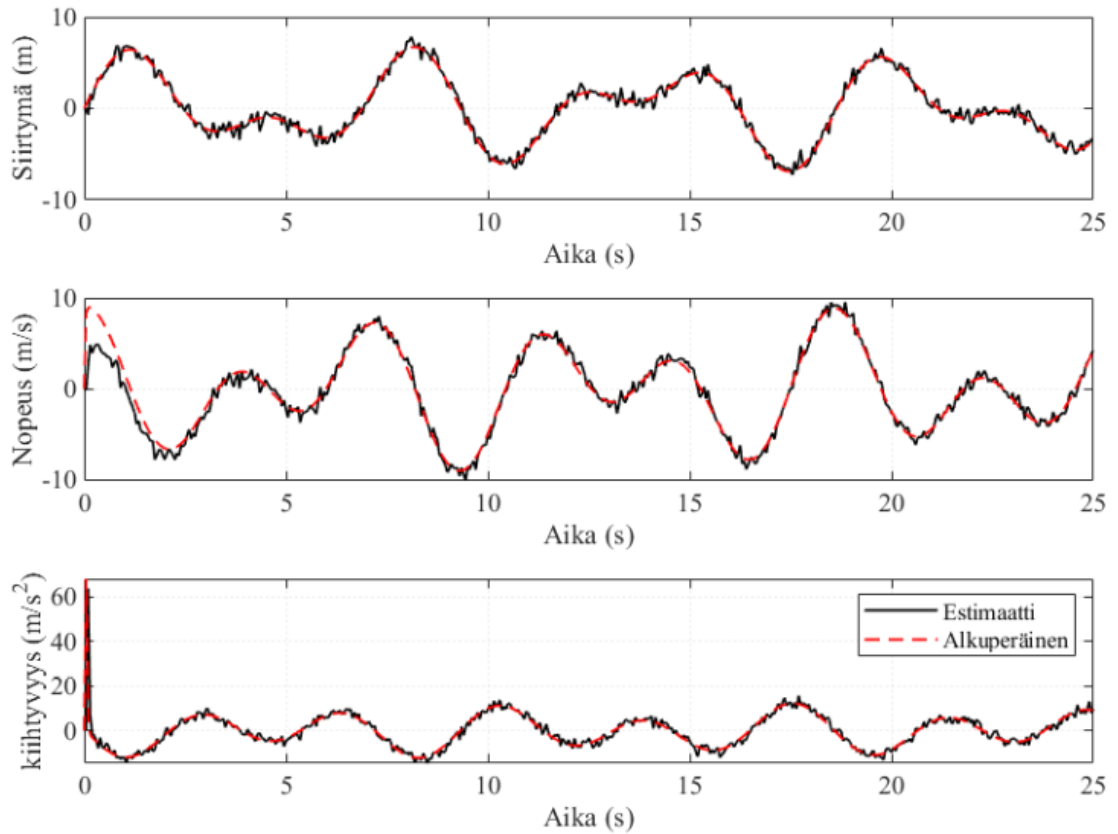
$$D = 0. \quad (5.6)$$

C-matriisin korkeuden tilamuuttujaan (Kaava 5.5) on lisätty ilmanpaineen muuntaminen korkeudeksi, kerroin $-p * g$, jotta barometrin mittaukset voidaan ottaa huomioon. C-matriisissa täytyy myös olla yhtä monta riviä, kuin fuusioitavia sensoreita.

Kuvassa 10. on esitettynä Kuvan 8. tilamallilla estimoitu aalto. Kuvan 8. mallissa ei ole mallinnettu oikeita sensoreita, vaan mittaustajuuudet ja virheet ovat mielivaltaisia. Tuloksista voi kuitenkin nähdä, että malli estimoii aallon eri tiloja tarkasti.



Kuva 9 Simulink-mallinnus aallosta ja sensorifuusiosta usealla sensorilla



Kuva 10 Alkuperäisen ja mallinnetun aallon tilojen vertailu

Testeissä sensoreita yhdistettiin enimillään kuusi kappaletta. Kuvassa 9 on esitettyä Simulink -mallinnus kuudella sensorilla: kolmella barometrilla ja kolmella kiihtyvyyssanturilla. Kappaleessa 6 tehdyn testin perusteella, useamman sensorin sensorifuusiolla saadaan tuloksia pienemmällä virheellä.

6 SENSORIEN VERTAILU

Tähän asti työssä on johdettu ja esitelty teoreettinen tapa mallintaa aaltoa lineaarisen aaltoteorian ja sensorifuusion avulla. Tässä kappaleessa useiden teollisten sensoreiden virhearvot ja mittaustaajuudet sovitetaan kehitettyyn malliin, ja tuloksia vertaillaan keskenään.

Sensoreiden valinnassa otettiin huomioon niiden soveltuvuus aaltopoijuun. Mitä pienempi virhearvo, sen parempi. Useita sensoreita samoilla virhearvoilla ei valittu. Testeissä mittaustaajuuksina käytettiin mallin askelvasteen kertoimia. Mallin askelvaste oli 0.05 sekuntia.

6.1 Sensorit

Honeywellin ja Vaisalan valikoimista löytyi monipuolisin valikoima sensoreita. Honeywellin kiihtyvyyssanturit ovat tarkoitettuja käytettäväksi vaativiin oloihin kuten öljynporauslaitteille [18], joten ne sopivat hyvin aaltopoijuihin, jotka joutuvat kestäämään myrskyjä. Vaisalan sensorien käytössä mainitaan myös erikseen datapoijut.

Taulukossa 1 ja 2 on esiteltynä poijut, niiden virheet, ja testeissä käytetyt mittaustaajuudet. Kaikissa sensoreissa mittaustaajuus on mahdollista valita itse. Taulukossa on huomioitavaa, että vain testissä 1 käytettiin sensoreille muita mittaustaajuuksia kuin 0.05.

Kiihtyvyyssanturi	Mittaustaajuus	Virhe (g)
<i>Honeywell QA-2000 [18]</i>	<i>0.05/0.1/0.3</i>	<i>0.004g</i>
<i>Honeywell QA-750 [18]</i>	<i>0.05/0.1/0.3</i>	<i>0.008g</i>
<i>Honeywell Mini Q [18]</i>	<i>0.05/0.1/0.3</i>	<i>0.0015g</i>

Taulukko 1 Testiin valitut kiihtyvyyssanturit. Huom. kiihtyvyyssanturin virhettä mitataan g:ssä. Yksi g on 9.81m/s^2 .

Barometri	Mittaustaajuus	Virhe (Pascal)
<i>Vaisala PTB330</i>	<i>0.05/0.1/0.3</i>	<i>15</i>
<i>Vaisala PTB110 [19]</i>	<i>0.05/0.1/0.3</i>	<i>30</i>
<i>Grove HA</i>	<i>0.05/0.1/0.3</i>	<i>10</i>

Taulukko 2 Testiin valitut Barometrit.

6.2 Testit

Testeissä erilaiset sensoriyhdistelmät ajettiin mallin läpi. Testeissä huomioitiin estimoidun aallon visuaalinen samankaltaisuus syöttöarvoon, virheen absoluuttinen keskiarvo *MAE* ja virheen neliöllinen keskiarvo *RMSE*. Kaavoissa estimaattiin viitataan lyhenteellä *Est* ja syöttöarvoon lyhenteellä *Input*. Virheet laskettiin vain siirtymään estimaatille, sillä muilla tiloilla ei niinkään ole väliä. Virheiden kaavat esitellään alla:

$$E = Input_j - Est_j, \quad (6.1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |Input_j - Est_j|, \quad (6.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Input_j - Est_j)^2}. \quad (6.3)$$

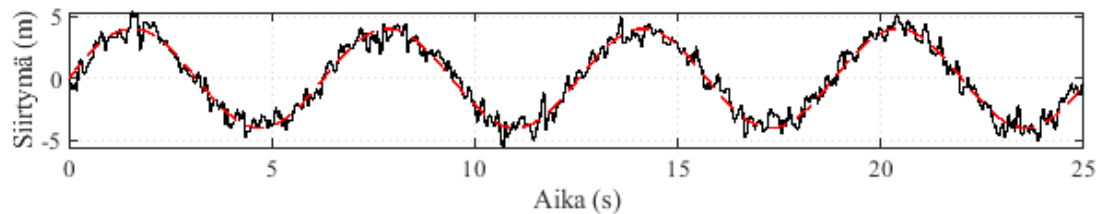
Testit suoritettiin käyttämällä ensin kaikkia kuutta sensoria yhdessä. Oletuksena oli, että näin saataisiin paras tulos. Sen jälkeen kiihtyvyyssanturit ja barometrit yhdistettiin jokaisella mahdollisella tavalla. Testejä tehtiin yhteensä kymmenen. Testien virheen laskemisessa käytetty mittaustaajuus *j* on 0.05 sekuntia.

Testi Nro	Sensorit
1	<i>Kaikki</i>
2	<i>QA-2000, PTB330</i>
3	<i>QA-2000, PTB110</i>
4	<i>QA-2000, Grove HA</i>
5	<i>QA-750, PTB330</i>
6	<i>QA-750, PTB110</i>
7	<i>QA-750, Grove HA</i>
8	<i>Mini Q, PTB330</i>
9	<i>Mini Q, PTB110</i>
10	<i>Mini Q, Grove HA</i>

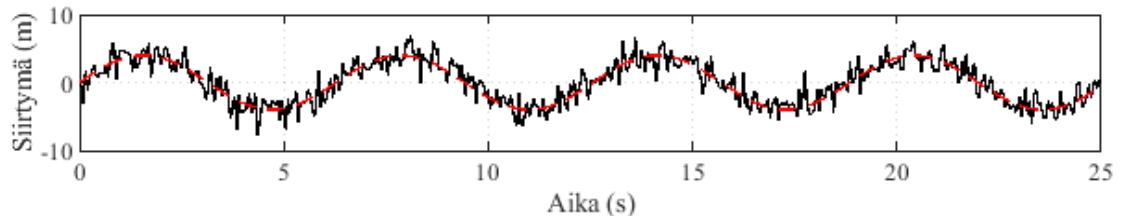
Taulukko 3 Testeissä käytetyt sensorit

Testit	MAE (m)	RMSE (m)
1	0.4173	0.5272
2	1.1421	1.4426
3	1.6147	2.0397
4	0.9321	1.1778
5	1.1415	1.4422
6	1.6145	2.0396
7	0.9320	1.1776
8	1.1418	1.4425
9	1.6148	2.0398
10	0.9323	1.1779

Taulukko 4 Testien virhearvot



Kuva 11 Testi 1:n tuottama estimaatti siirtymälle



Kuva 12 Testi 2:n tuottama estimaatti siirtymälle

Testien perusteella paras estimaatti saadaan yhdistäessä kaikki sensorit. Tukien olemuksesta, että estimoinnissa käytettyjen sensorien määrä parantaa estimaatin tarkkuutta. Virheiden, ja kuvien 11 ja 12 perusteella, estimaatin tarkkuus paranee jopa kaksinkertaiseksi. Tulosten perusteella uskon, että tarkan aaltopojjun voi rakentaa, kun useita sensoreita yhdistellään sensorifuusiolla

Testien 2-12 perusteella huomattiin lähinnä, että barometrin muutos vaikutti simulaation tarkkuuteen enemmän kuin kiihtyvyyssanturin muutos. Tämä vaikuttaisi johtuvan siitä,

että vaihtaessa barometria virhe muuttuu suhteessa enemmän, kuin vaihtaessa kiihtyvyyssanturia.

7 PÄÄTELMÄT

Työssäni tutkittiin tapoja mallintaa vedessä kulkevan aallon parametreja ja muotoa aaltopoijuilla. Aloittaessani työn tekemisen en tiennyt miten aaltoa mallinnetaan olemassa olevilla aaltopoijuilla. Löydökseni perustuvat työn aikana tehtyyn tutkimukseen. Kaikki löytöni perustuvat tunnettuihin matemaattisiin kaavoihin ja menetelmiin.

7.1 Johtopäätökset

Kandidaatintyön tulosten perusteella uskon, että tarkan aaltopoijun voi rakentaa yhdistämällä useita barometreja ja kiihtyvyyssantureita työn kuvailemalla tavalla, eli Kalman suotimella. Uskon myös, että aaltopoijuja valmistava hollantilainen yhtiö Datawell [9] käyttää samaa menetelmää.

Teoreettisen työn haasteeksi osoittautui, että tilamallin ja laskennan tehokkuutta ei voi arvioida pelkästään teoreettisin menetelmin. Esimerkiksi monimutkainen tilamalli ja useamman sensorin yhdistäminen Kalman suotimella vaativat paljon tehoa. Akulla toimivassa aaltopoijussa ei voi olla paljon laskentatehokkaasti kuluttavia prosesseja ja sensoreita, muuten akku tyhjenee nopeasti, vaikka sitä lataisikin aurinkokennoilla. Myöskään menetelmien tarkkuutta ei voi taata testaamatta niitä luonnossa

Koen kuitenkin, että johtamallani yksinkertaisella tilamallilla saadaan tyydyttäviä tuloksia aallon ominaisuuksien johtamiseksi, ja että tämä kandidaatintyö olisi hyvä lähde toimivan aaltopoijun rakentamisessa. Olisi mielenkiintoista saada selville, miten työssäni esitetyt menetelmät toimisivat luonnon olosuhteissa. Toimivan aaltopoijun rakentaminen voisi olla työläs, mutta hyvä aihe diplomityöksi.

LÄHTEET

- [1] H. E. Krogstad, ja Ø. A. Arntsen. Linear wave theory Part A Regular waves. Norwegian University of Science and Technology. 2000. Saatavissa (viitattu 21.10.2019): http://folk.ntnu.no/oivarn/hercules_ntnu/LWTcourse/
- [2] T. H. C. Jessen, P. F. Janssen, T. T. Colbert ja D. B. MacMahan. Observing Ocean Surface Waves with GPS-Tracked Buoys. Department of Oceanography, Naval Postgraduate School, Monterey, California. 2012. Saatavissa (viitattu 22.10.2019): <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JTECH-D-11-00128.1>
- [3] R. A. Dalrymple. Wave Propagation in Shallow Water. ICCE 1992 local organising committee. 1992. Saatavissa (viitattu 22.10.2019): <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:521a8b94-b32f-4cb0-b472-946c90b9e609>
- [4] Starlino. A Guide To using IMU (Accelerometer and Gyroscope Devices) in Embedded Applications. Starlino Electronics. 2009. Saatavissa (viitattu 23.10.2019): http://www.starlino.com/imu_guide.html
- [5] M. I. Skolnik. Radar Handbook, third edition. 2008 The McGraw-Hill Companies. 2008. Saatavissa (viitattu 26.10.2019): <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071485470>
- [6] W. J. Pierson Jr. ja L. Moskowitz. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. the American Geophysical Union. 1963. Saatavissa (viitattu 26.10.2019): <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JZ069i024p05181>
- [7] R. G. Dean, ja R. A. Dalrymple. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Prentice-Hall Inc 1984. Saatavissa (viitattu 26.10.2019): <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=85040805103&partnerID=8YFLogxK>
- [8] Science learning hub, Waves undergoing refraction. Science Learning hub. 2011. Saatavissa (viitattu 28.10.2019): <https://www.sciencelearn.org.nz/images/115-waves-undergoing-refraction>
- [9] Datawell, DWR4 with ACM. Datawell company. 2012: Saatavissa (viitattu 19.11.2019): http://datawell.nl/Portals/0/Documents/Brochures/datawell_brochure_dwr4_acm_b-38-07.pdf
- [10] G. B. Airy. Tides and Waves. 1884. Julkaisija ei selvillä.
- [11] P. Boccotti. Wave mechanics and wave loads on marine structures. Elsevier Science. 2014. Saatavissa (viitattu 19.11.2019): <https://www.elsevier.com/books/wave-mechanics-and-wave-loads-on-marine-structures/boccotti/978-0-12-800343-5>

- [12] M. Testorf, B. Hennelly ja J. Ojeda-Castañeda. Phase-Space Optics: Fundamentals and Applications. Sampling and Phase Space, Chapter (The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010). Saatavissa (viitattu 24.11.2019): <https://www.accessengineering-library.com/content/book/9780071597982/chapter/chapter10>
- [13] M. Reistad, Ø. Breivik, H. Haakenstad, O. Aarnes, B. Furevik, J. R. Bidlot. High-resolution hindcast of wind and waves for the North sea, the Norwegian sea and the Barents sea. Norwegian Meteorological Institute, Norway. 2011. Saatavissa (viitattu 24.11.2019): <https://arxiv.org/pdf/1111.0770.pdf>
- [14] E. Vanem. Joint statistical models for significant wave height and wave period in a changing climate. Elsevier Science. 2016.
- [15] M. Kanoğlu, Y. Çengel, J. Cimbala, Fundamentals and Applications of Renewable Energy. 2020. Saatavissa (viitattu 27.11.2019): <https://www-accessengineeringlibrary-com.libproxy.tuni.fi/content/book/9781260455304/toc-chapter/chapter9/section/section4>
- [16] J.Z Sasiadek, P. Hartana, Sensor Data Fusion Using Kalman Filter. 2000. Saatavissa (viitattu 16.11.2020): https://www.researchgate.net/publication/3859405_Sensor_data_fusion_using_Kalman_filter
- [17] MathWorks, Constant-acceleration motion model. Saatavissa (viitattu 16.11.2020): <https://se.mathworks.com/help/fusion/ref/constacc.html>
- [18] Honeywell, Accelometers. Saatavissa (viitattu 1.12.2020): https://aerospace.honeywell.com/en/learn/products/sensors/accelerometers-high-performance-accelerometers?utm_source=google&utm_medium=paid_search&utm_campaign=20_Accelerometer_JD&utm_term=accelerometer&utm_content=accelerometer&s_kwcid=AL!7892!3!474311677572!b!!g!!accelerometer%20definition
- [19] Vaisala, PTB110 Barometer. Saatavissa (viitattu 1.12.2020): <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/ptb110>
- [20] OpenDem, Height measurements with GPS and barometer. Saatavissa (viitattu 31.1.2021): https://www.opendem.info/gps_barometer.html