

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Kone- ja laiteautomaatio

Tutkintotyö

Mikko Uusitalo

AALTOSORVI

Työn ohjaaja

Työn teettäjä

Tampere 2005

DI Kari Järvinen

Tampereen Ammattikorkeakoulu, Koneosasto

# TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Kone- ja laiteautomaatio

Uusitalo, Mikko Aaltosorvi

Tutkintotyö 28 sivua

Työn ohjaaja DI Kari Järvinen

Työn teettäjä TAMK

Toukokuu 2005

Hakusanat Sähköntuotanto, aaltoenergia

## TIIVISTELMÄ

Sähköntuotannossa on etsitty ympäristöystävällisempiä tapoja tuottaa sähköä. Näistä vihreämmistä tavoista yksi on meren aaltojen energian hyväksikäyttö sähköntuotannossa. Olemassa on jo tällaisia laitteita, mutta niissä käytetään hyödyksi yleensä vain aallon pystysuuntainen liike.

Työn aiheena oli toteuttaa ja testata laitteistoa, jolla saadaan kerättyä meren aalloista energiaa. Tämä käytetään edelleen sähköntuotantoon. Laitteen ydin on patentti, jonka ”ympäri” laite tehdään. Laitteella on tarkoitus saada käytettyä hyödyksi sekä aallon pystysuuntainen että horisontaalinen liike-energia.

Työssä on esitelty käytetty laitteisto ja sen testaus.

Laitteen todellista tehoa tai luotettavuutta ei testeissä testattu. Testit olivat lähinnä ensitestejä, joiden tulosten perusteella päätetään, onko laitetta järkevää lähteä kehittämään edelleen. Malli ja aallot olivat liian pieniä, että niitä olisi voinut kuormittaa.

Tulevaisuudessa laitteistoa on tarkoitus testata isommassa koossa, jolloin sitä voidaan kuormittaa, ja saatavien tulosten perusteella edelleen tutkia, onko laite kehityskelpoinen.

TAMPERE POLYTECHNIC

Mechanical and Production Engineering

Mechanical engineering

Uusitalo, Mikko                      Aaltosorvi

Engineering Thesis                28 pages,

Thesis Supervisor                 Kari Järvinen (MSc)

Commissioning Company TAMK

May 2005

Keywords                              Electricity production, wave-energy

## ABSTRACT

There have been a search of more environmentally friendly ways to make electricity. One of these green ways is usage of sea waves in electricity production. There is already this kind of machines but most of them usually uses only the vertical movement from the wave.

The subject of this thesis was to develop and test a machine that uses the energy from the waves to make electricity. Idea is that the machine uses both vertical and horisontal movement.

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO .....	4
1. JOHDANTO .....	5
2. AALLON TEORIA .....	6
2.1 Aallokko ja sitä kuvaavat suureet .....	6
2.2 Aallokon sisältämä energia .....	8
2.3 Aallon murtuminen ja nopeus .....	10
2.4 Virtausvastus .....	12
3. KOKEET .....	13
3.1 Testiolosuhteet .....	14
3.2 Kelluntatesti .....	16
3.3 Testaus aaltoaltaassa .....	17
4. TULOSTEN TARKASTELU .....	18
4.1 Laitteen nopeus .....	18
4.2 Alavarren tekemä kulma .....	19
4.3 Energia .....	20
4.4 Eri muuttujien vaikutus alavarren tekemään kulmaan .....	22
4.4.1 Varsien pituuksien vaikutus .....	23
4.4.2 Säiliön tekemän ympyrän koon vaikutus alavarren tekemään kulmaan .....	24
4.4.3 Säiliön tekemän ympyrän ja alatelineen etäisyyden vaikutus alavarren tekemään kulmaan .....	25
4.4.4 Massan vaikutus .....	26
5. YHTEENVETO .....	27
6. LÄHTEET .....	28

## 1. JOHDANTO

Työn aiheena on toteuttaa ja testata laitteistoa, jolla saadaan kerättyä meren aalloista sähköntuottoon käytettävää energiaa. Laitteen ydin on patentti, jonka ympärille laite tehdään. Laitteessa olevan säiliön on tarkoitus liikkua aallon mukana tehden ympyrämäistä liikerataa. Liike muutetaan varsien avulla edestakaiseksi liikkeeksi, joka saadaan muutettua takaisin pyöriväksi liikkeeksi akselille, joka pyörittää generaattoria.

Laitteen todellista tehoa tai luotettavuutta ei testeissä testata. Testit ovat lähinnä ensitestejä, joiden tulosten perusteella päätetään, onko laitetta järkevää lähteä kehittämään edelleen. Malli on liian pieni kuormitettavaksi. Muissa olemassa olevissa aaltoenergian keruulaitteistoissa hyödynnetään yleensä vain aallon pystysuuntainen liike.

Laitteen hyvänä puolena muihin aalloista energiaa kerääviin laitteistoihin nähden on, että laitteella pystytään keräämään sekä pystysuuntainen että horisontaalinen liike-energia.

Varsinainen testaus suoritetaan tälle mallille Otaniemessä merilaboratorion Teknillisen Korkeakoulun aaltoaltaassa.

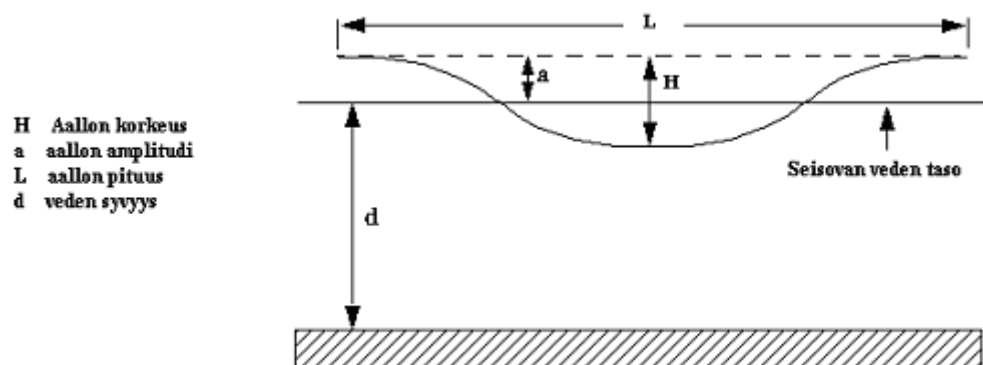
## 2. AALLON TEORIA

### 2.1 Aallokko ja sitä kuvaavat suureet

Aallokon kasvuun vaikuttavat *tuulen nopeuden* lisäksi ensisijaisesti *tuulen kesto aika* ja *pyyhkäisymatka*. (Pyyhkäisymatka on matka, jolla tuuli vaikuttaa). Kun tuulen kesto aika ei rajoita kasvua, pyyhkäisymatka määrää aallokon korkeuden. Myös vesialueen muoto ja veden syvyys vaikuttavat aallokon kasvuun. Pohja alkaa vaikuttaa aaltoon, kun veden syvyys on alle puolet aallonpituudesta. Veden suolaisuudella tai lämpötilalla ei juuri ole merkitystä, ainoastaan ilman ja veden lämpötilaeron on todettu vaikuttavan aallokon kasvuun. Kun vesi on ilmaa lämpimämpää, aallot kasvavat jonkin verran nopeammin kuin päinvastaisessa tilanteessa. Syksyllä ja talvella vesi on usein ilmaa lämpimämpää, mutta ajanjakson korkeat aallokko johtuvat pääasiassa siitä että kovia tuulia on useammin kuin kesäkautena. /4/

Syvässä vedessä aallonpituus on selvästi yhteydessä aallon periodiin: lyhyillä aalloilla on pienempi periodi kuin pidemmällä. Pitkät aallot myös etenevät nopeammin kuin lyhyet aallot. Aallokko on epäsäännöllinen, ja täsmälleen samanlaista aaltokenttää ei muodostu toista kertaa, vaikka olosuhteet olisivat samat. Aallokon suunta ei ole välttämättä sama kuin tuulen suunta. /1/

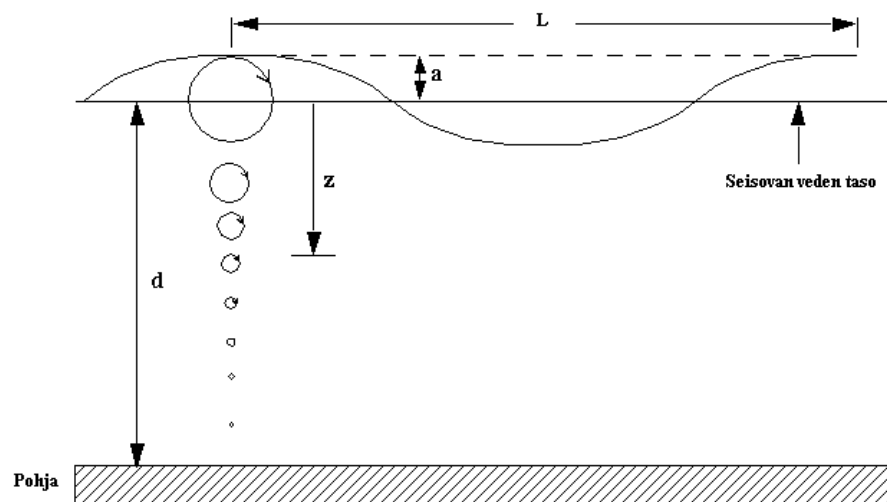
Kuvassa 1 on yleisimmät termit aallokosta.



Kuva 1. Aallokosta käytetyt termit /1/

Aallon korkeus  $H$  on etäisyys aallon harjalta aallon pohjalle. Amplitudi  $a$  on aallon harjan korkeus seisovan veden tasosta. Aallon pituus  $L$  on kahden peräkkäisen aallonharjan välinen etäisyys.

Vesimolekyylit liikkuvat ympyrän muotoisesti aallossa (kuva 2). Molekyylien kulkema rata on ideaalitapauksessa ympyrän muotoinen. Aallon käyttäytyminen riippuu paljolti aallon koon ja veden syvyyden (jonka läpi aalto liikkuu) suhteesta. Vesimolekyylien liike muuttuu ympyrästä ellipsiin, kun aalto lähestyy rantaa ja veden syvyys pienenee. Lopulta, kun aalto kääriytyy ylös rannalle ja kun useimmat meistä havaitsevat aallot, liike on pääasiassa vaakasuoraa. /1/



Kuva 2. Partikkelin liikerata eri syvyyksissä. /1/

Pinnassa partikkelin rata on kooltaan sama kuin aallon amplitudi. Syvemmälle mentäessä partikkelin rata pienenee eksponentiaalisesti seisovan veden tasoon nähden. /1/

Radan koko  $r(z)$  voidaan laskea kaavalla 1. /1/

$$r(z) = ae^{-2\pi\frac{z}{L}} \quad (1)$$

missä  $z$  on lasketun radan syvyys.

## 2.2 Aallokon sisältämä energia

Erityyppisistä meren aalloista tuulen aikaansaamissa aalloissa on eniten energiaa. Tuuliaallot aiheutuvat tuulen puhaltaessa merellä. Tämä energian siirto tarjoaa luonnollisen varaston tuulienergialle vedessä lähellä veden pintaa. Kerran luotuna tuuliaallot voivat matkustaa tuhansia kilometrejä vähin energiahävikkein elleivät ne kohtaa vastatuulta. Lähempänä rannikkoa aallon energian tiheys kasvaa. Energian häviäminen lähellä rannikkoa voidaan selittää luonnollisilla ilmiöillä kuten heijastuminen, joka johtaa energiakeskittymiin ("hot spots"). /2/

Aaltoenergia on jakautunut epätasaisesti ympäri maailman (kuva 3). Suurempia energiamääriä esiintyy  $30^\circ$  ja  $60^\circ$  leveysasteen välissä molemmin puolin päiväntasaajaa. /3/



Kuva 3. Energian jakautuminen ympäri maailman kW/m leveysmetrillä. /3/



On arvioitu, että maapallolla rannikoille murtuvien aaltojen kokonaisenergia on 2- 3 miljoonaa megawattia. Suotuisissa olosuhteissa aaltoenergia voi arviolta olla 65 megawattia rannikkomailia kohden. Maailman energia-neuvoston (The World Energy Council) mukaan meri voi tuottaa energiaa kaksi kertaa niin paljon kuin sitä tällä hetkellä tarvitaan. Skotlannin saarella sijaitseva maailman ensimmäinen kaupallinen aaltovoimala aloitti toimintansa vuonna 2000. Voimala tuottaa tällä hetkellä 500 kW sähköä, joka riittää valaisemaan 400 kotia. Aaltoenergiaa on käytetty maissa, joilla on paljon rantaviivaa, esim. Iso- Britannia, Australia. /3/

Aalloissa oleva energia syntyy aaltojen liikkeestä sekä niiden korkeuden ja nopeuden vaihteluista. Aalloissa on valtavasti kineettistä energiaa, arviolta 4 jalkaa korkea, 10 sekunnin pituinen aalto antaa murtuessaan enemmän kuin 35 000 hevosvoimaa rannikkomailia kohden. Aallot saavat energiansa tuulesta. Aallot kokoavat, varastoivat ja kuljettavat energiaa tuhansia maileja pienellä hävikillä. /3/

On arvioitu, että parantuvan teknologian myötä saadaan tuotettua aaltoenergiaa suurin piirtein samalla hinnalla kuin tuulienergiaa eli noin 4.5 c/kWh. Tällä hetkellä paras aaltovoimala on Englannissa. Se tuottaa energiaa 7.5 c/kWh. Vertailukohteena hiilivoimala, joka tuottaa sähköä n. 2.6 c/ kWh. /3/

Valtameren aaltoenergia on hyvin tiheää verrattuna muihin uusiutuviin energiamuotoihin, usein se tarjoaa 15 - 20 kertaa enemmän saatavaa energiaa per neliometri kuin tuuli tai aurinko. Se on ilmaista, runsasta ja laajasti saatavilla. Aaltoenergiaa kerääviä laitteita on keksitty paljon, mutta vain harvaa on testattu ja toteutettu. Vielä harvempaa joukkoa keksinnöistä on testattu todellisissa olosuhteissa merellä. /3/

Aallot ovat energian liikettä, mutta vesi ei liiku samalla tavalla. Esimerkiksi merellä aallot liikuttavat vettä ylös ja alas, mutta itse vesi ei liiku juuri kohti

rantaa. Näin ollen aallot eivät edusta veden virtausta, vaan energian liikettä alkupisteestä lopulliseen hajaantumispisteeseen. Hajaantuminen voi tapahtua keskellä merta tai vasten rannikkoa. /3/

Suurin osa aallon energiasta on lähellä aallon pintaa ja vähenee jyrkästi syvyyteen mennessä. Tästä johtuen suurin osa energiankeruulaitteista on suunniteltu kellumaan ja jopa rikkomaan veden pinta näin maksimoiden energiankeruun. /1/

Aallon teho voidaan kuvata seuraavalla kaavalla: /4/

$$P = \frac{\rho g^2 T H^2}{32\pi} \quad (2)$$

missä  $\rho$  = meriveden tiheys,  $T$  = aallon jaksonaika ja  $H$  = aallon korkeus. teho on ilmoitettu per leveysyksikkö.

### 2.3 Aallon murtuminen ja nopeus

Aallon taajuus on käänteinen aallon jakson kanssa. Matalataajuiset aallot liikkuvat nopeammin kuin korkeataajuiset aallot. Aaltojen lähestyessä rantaa niiden nopeus, aallonpituus, suunta ja korkeus muuttuvat madaltumisen myötä ennen kuin aallot murtuvat rannalla. Kun aallot ovat murtuneet, ne tulevat tyrskyvyöhykkeelle. Vyöhykkeellä tapahtuu monimutkaisia muodonmuutoksia ja ilmenee aaltojen vaimennusprosessi sekä tehokas sedimenttien kulkeutuminen rantamateriaalin kanssa. /1/

Aallon murtumiseen vaikuttavat ratkaisevasti aallon jyrkkyys sekä aallon korkeuden suhde veden syvyyteen. Aallon jyrkkyyden ( $H/L$ ) ollessa pienempi

kuin 1/7 aalto ei murru. Aallon korkeuden ja syvyyden suhteen murtumisen indeksi (H/d) on vastaavasti 0.78. /1/

Kun veden pinnalla olevat aallot matkaavat eri syvyyden vesien läpi, niiden jakso T ei muutu. Syvässä vedessä on sen vuoksi aallon pituus aina vakio, mutta kun aallot lähenevät rantaa, aallon pituus pienenee syvyyden neliön mukaan.

Aallon nopeus on aallon pituuden (L) ja veden suhteellisen syvyyden (d/L) funktio. Aallon nopeus siis riippuu em. seikoista siten, että matalan veden, keskisyvän- ja syvän veden aallon nopeus (celerity) ja pituus lasketaan eri kaavoilla (taulukko 1). /1/

Taulukko 1. Aallon nopeus ja pituus eri syvyyksissä vesissä /1/

Veden suhteellinen syvyys	Aallon tyyppi	Aallon nopeus	Aallon pituus
$d/L < 0.05$	Matalan veden aalto	$\sqrt{gd}$	$\sqrt{gd}T$
$0.05 < d/L < 0.50$	Keskisyvän veden aalto	$\sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{d}{L}\right)}$	$\frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{d}{L}\right)$
$d/L > 0.50$	Syvän veden aalto	$\sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$	$\frac{gT^2}{2\pi}$

Syvässä vedessä aallon nopeus on riippumaton veden syvyydestä, koska aallot eivät ole kosketuksissa pohjan kanssa. Kiinnostavaa on kuitenkin, että aallon nopeus riippuu aallon pituudesta syvässäkin vedessä. Matalan veden pinnalla olevat aallot taasen tuntevat pohjan ja hidastuvat syvyyden neliön mukaisesti. Niiden nopeus ei ole kuitenkaan aallon pituuden funktio. /1/

Tuulen synnyttämien aaltojen periodi on tyypillisesti 1- 25 sekuntia, aallon pituus 1- 1000 metriä, nopeus 1 – 40 m/s ja korkeus alle 3 metriä. Seismisen aallon (tsunamin) periodi on tyypillisesti 10 minuuttia - 1 tunti, aallon pituus useita satoja kilometrejä ja keskivaltameren aallon korkeus yleensä alle puoli metriä. /1/

## 2.4 Virtausvastus

Kokonaisvastus kappaleen ympärillä muodostuu kitkavastuksen ja muotovastuksen yhteisvaikutuksena. Tavanomaisissa tuulikanava- ja hinauskanavamittauksissa määritellään yleensä vain kokonaisvastus. /6/

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w_\infty^2 \cdot A_{St} \quad (3)$$

Missä

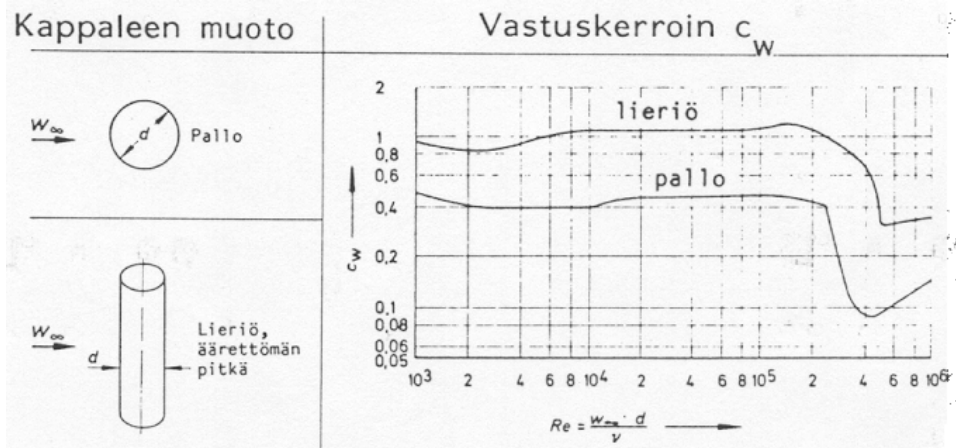
$c_w$  Vastuskerroin

$\rho$  veden tiheys

$w_\infty$  nopeus

$A_{St}$  Otsapinta – ala

Vastuskerroin  $c_w$  riippuu tylpissä, kulmikkaissa kappaleissa vain kappaleen muodosta, kun vanavesialue pysyy vakiona (eli kun irtoamiskohdassa on terävä särmä). Pyöreissä, pisaramaisissa tai virtaviivaisissa kappaleissa vastuskerroin  $c_w$  riippuu myös Reynoldsin luvusta, koska irtoamiskohta siirtyy Reynoldsin luvun funktiona. Näiden kappaleiden  $c_w$  –arvoja on kuvassa 4. /6/



Kuva 4. Vastuskertoimet kappaleen ulkopuolisessa virtauksessa. /6/

Annetut arvot koskevat täysin vapaassa virtauksessa olevaa kappaletta. Jos kappale on kanavassa, esimerkiksi auto tuulitunnelissa, kokonaisvastus lisääntyy huomattavasti. /6/

### 3. KOKEET

Hankkeessa tutkittiin ensisijaisesti kuvan 5 mukaista mekanismia. Tavoite oli ensi vaiheessa tutkia, onko valitsemallamme mallilla mahdollisuuksia saavuttaa haluamamme pyöreä liikerata.

Mekanismista on tarkoitus ottaa tehoa kahdella yksiköllä, jotka sijoitetaan alempien varsien alapäähän. Alavarret pyörittävät keruuyksikön akseleita liikkeessaan. Heilurin on tarkoitus liikkua aallon mukana aallossa olevan virtauksen mukaisesti edeten lähellä aallon pintaa. Aallon harjan ollessa korkeimmassa tilassaan laite liikkuu aallon kulkusuunnan mukaisesti, ja aallon ollessa alatilassa laite tekee paluuliikkeen.

Heilurilla saadaan hyödynnettyä myös pelkkä pystysuuntainen liike, mikäli virtaukset eivät ole riittävän suuria liikuttaakseen heiluria horisontaalisesti.

Näin sähköä saadaan tuotettua pienemmälläkin aallolla.

Kuvia ei luottamuksellisista syistä julkaista

Kuva 5. Periaatekuva laitteesta

### 3.1 Testiolosuhteet

Ensimmäinen testaus suoritettiin akvaariossa. Testin ainut tarkoitus oli tutkia, onko laitteella mahdollista saavuttaa laitteelle haluttu liikerata.

Varsinainen testaus suoritettiin Otaniemessä Teknillisen Korkeakoulun merilaboratorion aaltoaltaassa (kuva 6). Allas on 1,3 metriä leveä, 1,2 metriä syvä ja 50 metriä pitkä. Käytössä olleella aallontekokiilalla saadaan tuotettua enimmillään 17 cm aaltoja. Aallot tuotetaan liikuttamalla altaan päässä kolmiomaista kappaletta pystysuunnassa (kuva 7), joka saa aikaan aallot. Aaltojen taajuutta ja korkeutta pystytään säätämään. Kiilalla saa tehtyä myös jonkun verran tätä suurempia aaltoja, mutta tällöin ne eivät ole enää homogeenisiä. Testauksessa käytettiin pääasiassa säännöllistä aaltoa, mutta laitteen alkaessa toimia sitä testattiin myös epäsäännöllisillä aalloilla. Mikäli halutaan tuottaa suurempia aaltoja, ne voidaan tuottaa vaihtamalla kiilaksi erimallinen. /5/

Kuvia ei luottamuksellisista syistä julkaista

Kuva 6. Aaltoallas

Kuvia ei luottamuksellisista syistä julkaista

Kuva 7. Aaltoaltaan aallontekokiila

### 3.2 Kelluntatesti

Kelluntastaus tehtiin akvaariossa. Testauksessa pyrittiin testaamaan, kuinka paino vaikuttaa laitteen kelluvuuteen. Mallia (kuva 8) testattaessa laitetta liikutettiin kädellä ja testattiin, onko laitteella mahdollista saavuttaa haluttu ympyrämäinen liikerata. Laitteen rakenteellinen ratkaisu mahdollisti oikeanlaisen liikeradan.

Kuvia ei luottamuksellisista syistä julkaista

Kuva 8. Kuva ensimmäisestä versiosta

Ensimmäinen versio tehtiin viemäriputkesta ja varret vantturuuveista.

Heilurin yläpäässä on säiliö, joka painotetaan niin, että sen noste on oikeassa suhteessa vallitseviin aaltoihin. Näin saadaan aikaan säiliön riittävä painuma takaisinkulkua varten kuitenkin nosteen riittäessä säiliön nostoon takaisin pintaan.



### 3.3 Testaus aaltoaltaassa

Testausta varten tehtiin kolme erikokoista mallia, joita oli tarkoitus testata aaltoaltaassa. Lisäksi testausta varten tehtiin erimittaisia varsia ja erikokoisia painoja. Testauksissa todettiin pienin malli tarpeettomaksi. Testaus aloitettiin keskikokoisella mallilla (halkaisija n. 60 mm) ja painona käytettiin 60–100 grammaa ja varsina 170 mm pitkiä varsia.

Kolmen testaukserän jälkeen todettiin, että käytetty malli on liian pieni aaltoaltaan tuottamaan aaltoon nähden. Malli lähti liaksi mukaan aallon liikkeeseen eikä jäänyt tekemään haluttua ympyrämäistä liikettä.

Malliksi vaihdettiin suurempi malli (halkaisija n. 100 mm) varsien ollessa edelleen 170 mm pitkät. Testauksia suoritettiin useita, joissa haettiin sekä sopivaa painoa että aallokkoa, jossa laite toimii halutulla tavalla. Laite saatiin tekemään ympyrämäistä liikerataa, kun aallon korkeus oli 12-15 cm ja aallon jaksonaika oli 1,2-1,5 s laitteen kokonaispainon ollessa n.750 grammaa.

Laitetta testattiin myös jättämällä toisen puolen varret pois ja korvaamalla ne narulla. Laite liikkui hienosti, mutta testauksessa todettiin ongelmaksi, että vaikka säiliö liikkuu, niin liike ei välity enää riittävästi alempaan varteeseen josta on tarkoitus ottaa tehoa. Näin laite ei toteuta kunnolla sille asetettua tavoitetta tuottaa mahdollisimman suurta liikerataa alemmalle varrelle.

## 4. TULOSTEN TARKASTELU

### 4.1 Laitteen nopeus

Testattaessa laitetta se liikkui pystysuunnassa aallon korkeuden verran ja vaakasuunnassa suunnilleen aallon korkeuden verran korkeuden ollessa 12 cm ja aallon jaksoajan ollessa  $T=1,5$  s.

Käyttämämme aalto käyttäytyi keskisyvän veden aallon mukaisesti.  
(Suhteellinen syvyys 0,2-0,5).

$$\frac{d}{L} = \frac{0,8-1}{2-4} = 0,2-0,5$$

Aallon nopeus on laskettu käyttäen aallon pituutena  $L=3$  m ja veden syvyytenä  $d=1$  m

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{d}{L}\right)} = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 3}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{1}{3}\right)} = 2,13 \text{ m/s}$$

Aallon nopeudeksi ko. testissä tulee n. 1,8-2,3 m/s.

Kuitenkin laskettaessa keskinopeutta laitteelle arvoilla  $T=1,5$  s ja laitteen tekemän ympyrän halkaisija 12 cm saadaan

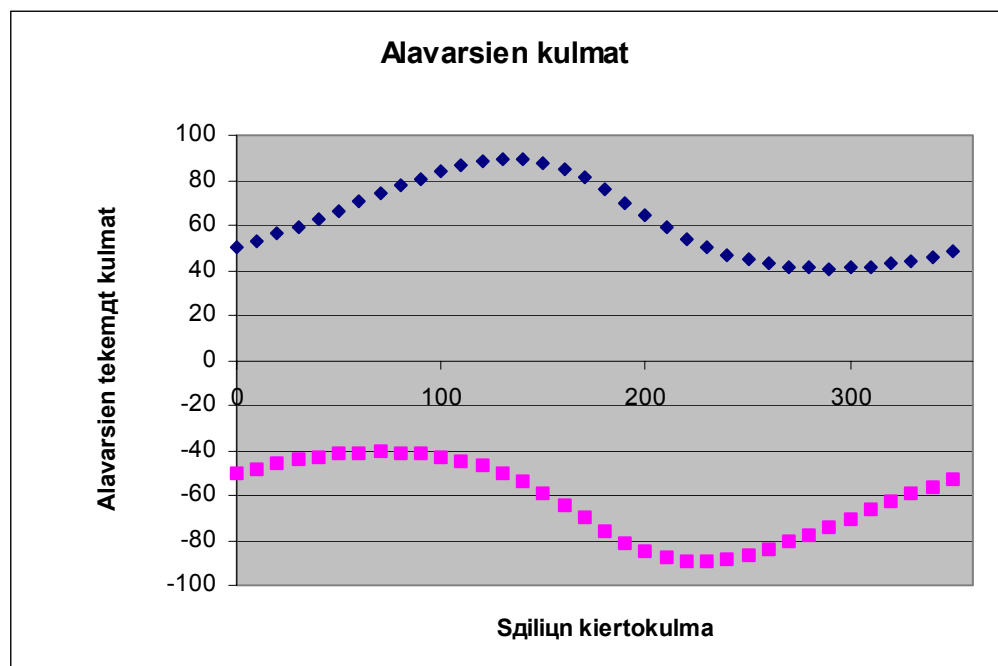
$$p = 2\pi r = d\pi = 12 \text{ cm} \cdot \pi = 38 \text{ cm}$$

$$v = \frac{s}{t} = \frac{0,38 \text{ m}}{1,5 \text{ s}} = 0,25 \text{ m/s}$$

Vaikka laite ei kulje aallon nopeutta, sitä tärkeämpi ominaisuus on se, että laite liikkuu koko ajan. Näin laitteesta saadaan kerättyä energiaa koko ajan.

## 4.2 Alavarren tekemä kulma

Kuvaajassa 1 sinisellä on merkitty oikeanpuoleisen varren tekemä liike ja punaisella vasemman varren tekemä liike. Pystyakselilla on varsien tekemä kulma pystysuoraan nähden. Vaaka-akseli on säiliön tekemän ympyrän liike asteina. Alavarren tekemän kulman asteet on laskettu käyttäen säiliön tekemän ympyräliikkeen halkaisijana 120 mm ja ympyräliikkeen keskipisteen ja alakiinnityskohdan välisenä etäisyytenä 200 mm. Varsien pituutena oli 170 mm. Molempien varsien tekemä liike on 48.4 astetta. Oikealla varrella kulman maksimikohta säiliön tekemän kulman mukaan ilmoitettuna on 130 asteen ja vasemmalla 70 asteen kohdassa. Vastaavasti minimikohdat ovat 290 ja 230. Varsien liikkeiden vaihe-ero on 60 astetta.



Kuvaaja 1. Alavarsien tekemät kulmat

### 4.3 Energia

Kun laite liikkuu, se kerää osan aallossa olevasta energiasta. Laitteen keräämä energia voidaan laskea käyttämällä liike-energian ja pyörimisenergian yhtälöitä. Energia saadaan muutettua tehoksi kertomalla se pyörimisnopeudella.

Etenemisen liike-energia  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

Momentin teho  $P = M\omega = M2\pi n$

Pyörimisenergia  $E_R = \frac{1}{2}J\omega^2$

Laitteen hitausmomenttina on käytetty sylinterin hitausmomenttia.

$$J = m\left(\frac{r^2}{4} + \frac{l^2}{12}\right)$$

Laskuissa on käytetty säiliön säteenä  $r = 0,05$  m, pituutena  $l = 200$  mm, massana  $m = 0,75$  kg ja aallon jaksonaikana  $1/1,5$  s.

Liike-energiaksi saadaan

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,75\text{kg} \cdot (0,3\text{m/s})^2 = 0,03375 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2}$$

Pyörimisenergiaksi saadaan

$$E_R = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} m \left( \frac{r^2}{4} + \frac{l^2}{12} \right) \cdot (2\pi n)^2$$
$$E_R = \frac{1}{2} \cdot 0,75 \text{ kg} \cdot \left( \frac{0,05^2 \text{ m}^2}{4} + \frac{0,2^2 \text{ m}^2}{12} \right) \cdot \left( 2\pi \frac{1}{1,5 \text{ s}} \right)^2 = 0,026 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2}$$

Energiaksi saadaan

$$E = E_k + E_R = 0,03375 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} + 0,026 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} = 0,0598 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2}$$

Tehoksi tulee

$$P = M 2\pi n = 0,0598 \text{ J} \cdot 2\pi \cdot \frac{1}{1,5 \text{ s}} = 0,25 \text{ W}$$

Kaavan 2 mukaan laskettu aallossa oleva teho on

$$P = \frac{\rho g^2 T H^2}{32\pi} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left( 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot 1,5 \text{ s} \cdot 0,06^2 \text{ m}^2}{32\pi} = 5,17 \frac{\text{N}}{\text{s}}$$

Teho on ilmoitettu yksikössä W/leveysmetri. Jotta saadaan laskettua säiliön leveyden sisältämä teho, tulee edellä laskettu säiliön leveydellä 20 cm.

$$P = 5,17 \frac{\text{N}}{\text{s}} \cdot 0,2 \text{ m} = 1,034 \text{ W}$$

Jotta saadaan laskettua laitteen laskennallinen hyötysuhde, käytetään laitteen tehoa ja aallossa laitteen leveydellä oleva tehoa.

$$\eta = \frac{P_{LAITE}}{P_{AALTO}} = \frac{0,25W}{1,034W} 0,2417 = 24,2\%$$

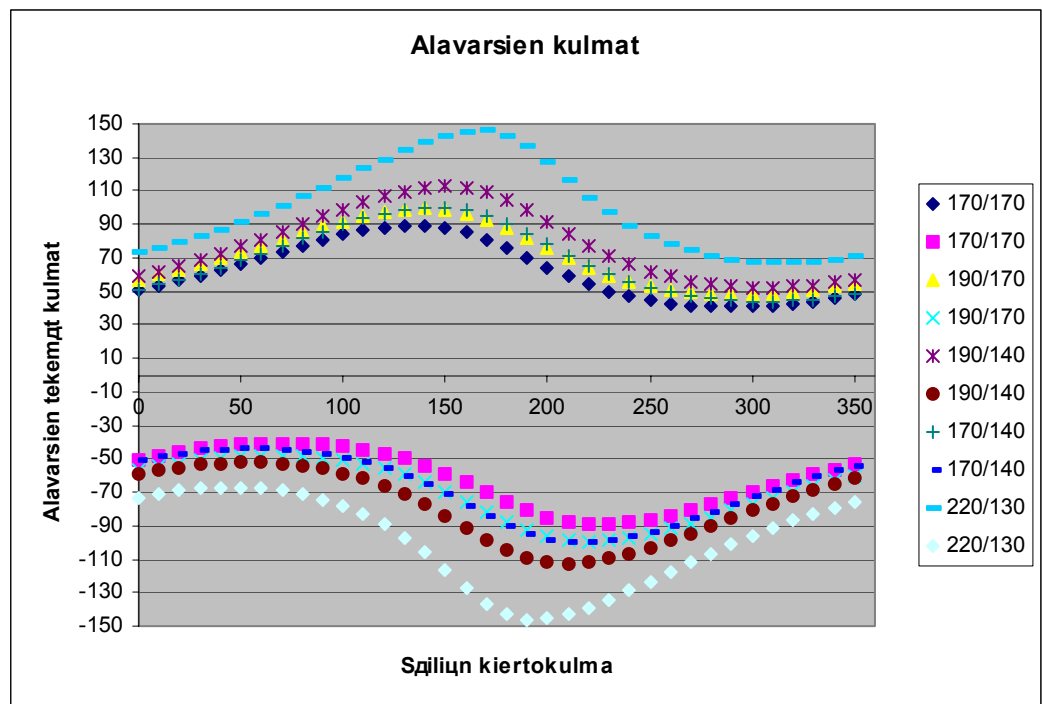
Hyötysuhde on täysin laskennallinen, koska tehot ovat laskettuja eivätkä mitattuja arvoja. Hyötysuhteessa ei ole myöskään otettu huomioon laitteen sisäisiä kitkoja. Näitä ei voida tässä ottaa huomioon, koska laitetta testattaessa sitä ei kuormitettu tai mitattu lainkaan.

#### **4.4 Eri muuttujien vaikutus alavarren tekemään kulmaan**

Edellä tehdyissä testeissä saaduissa tuloksissa ovat olleet lähes kaikki muuttujat vakioita. Eri muuttujia muuttamalla voidaan alavarren tekemän kulman suuruutta kasvattaa. Muutettavia asioita ovat esimerkiksi varsien pituudet, säiliön tekemän ympyrän eli aallon korkeuden muutos sekä alatelineen ja säiliön tekemän ympyrän välinen etäisyys.

#### 4.4.1 Varsien pituuksien vaikutus

Varsien pituuksien vaikutusta alavarren tekemään kulmaan on esitetty kuvaajassa 2. Ensin mainittu pituus on ylävarren pituus ja toisena alavarren pituus. Kuten kuvaajasta voidaan nähdä, varsien pituuksilla on suurta merkitystä. Samalla kun varsien kulmat muuttuvat pituuksien mukana, kulmien maksimi- ja minimikohdat muuttuvat.



Kuvaaja 2. Varsien pituuden muutoksen vaikutus

Mikäli alavarsille halutaan mahdollisimman suuri liikealue, valitaan ylävarsiksi selvästi pidemmät varret kuin alavarsiksi.

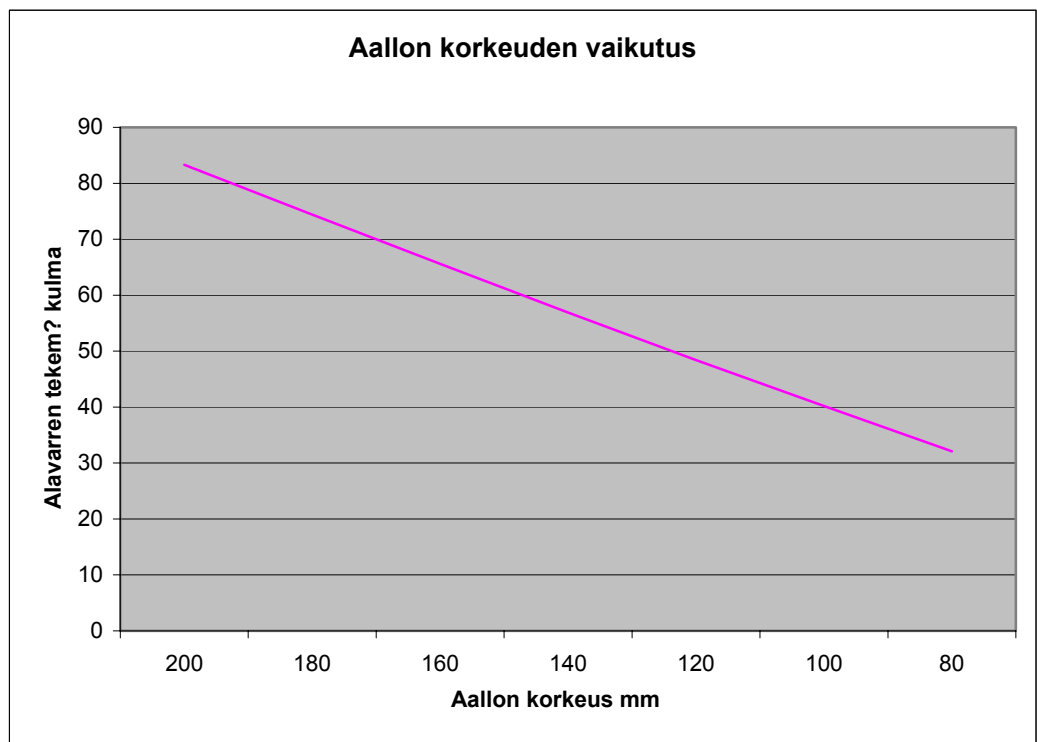
Esim. alavartena 130 mm ja ylävartena 220 mm on saatu noin 80 asteen liikerata aikaan vrt. testauksessa käytettyjen 170 mm varsien aikaansaama 48 astetta. Mitä suurempaa kulmaa alavarsi tekee, sitä heikommin varren kulman muutos vastaa sinikäyrää säiliön kiertokulman suhteen.

#### 4.4.2 Säiliön tekemän ympyrän koon vaikutus alavarren tekemään kulmaan

Säiliö tekee suunnilleen aallon korkeuden kokoista ympyrää liikkeessaan.

Kuvaajassa 3 on kuvattu, miten aallon korkeus, eli säiliön tekemän ympyrän halkaisija, vaikuttaa alavarsien tekemään kulmaan. Molempien varsien pituuksina on käytetty 170 mm. Arvot ovat täysin laskennallisia.

Kuten kuvaajasta nähdään, muutos on lineaarinen. Aiemmin lasketut arvot on laskettu käyttäen aallon korkeutena 120 mm.



Kuvaaja 3. Aallon korkeuden vaikutus alavarren tekemään kulmaan

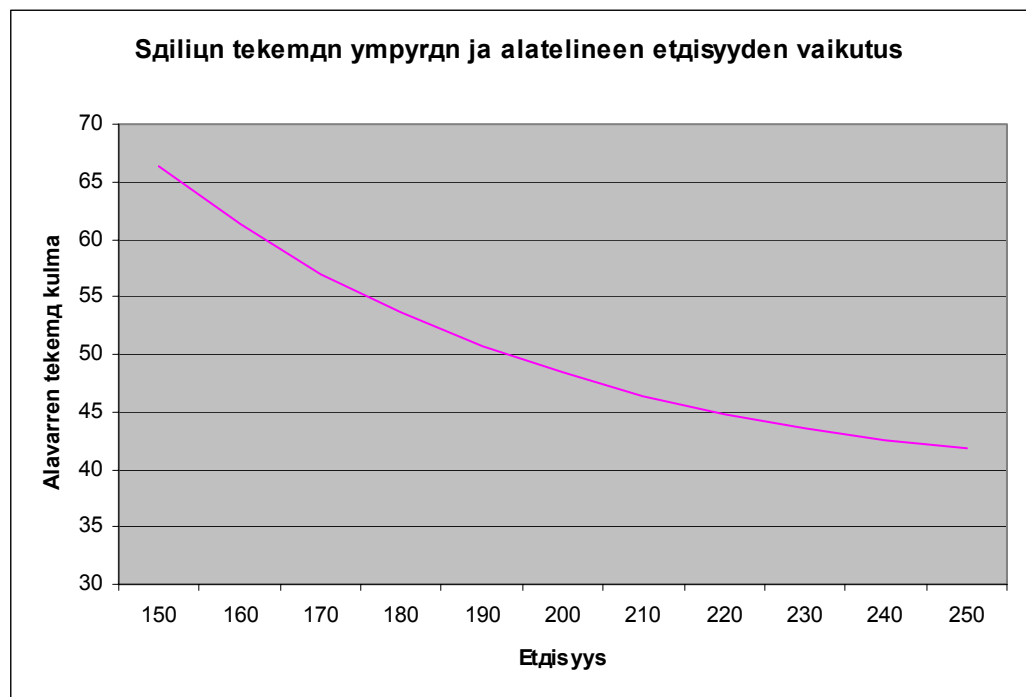
Kuvaajasta nähdään, että kulma kasvaa reilusti aallon korkeuden mukana.

Silti laite toteuttaa sille annettua tehtävää hienosti. Näin ollen laitetta voidaan käyttää hyvinkin erikokoisilla aalloilla.



#### 4.4.3 Säiliön tekemän ympyrän ja alatelineen etäisyyden vaikutus alavarren tekemään kulmaan

Säiliön tekemän ympyrän ja laitteen kiinnityskohdan etäisyys vaikuttaa alavarsien tekemään kulmaan siten, että pienemmillä etäisyyksillä kulma kasvaa ja suuremmilla etäisyyksillä kulma pienenee. Kuten kuvaajasta 4 nähdään, muutos on pienillä etäisyyksillä suurempi. Aiemmin lasketut kulmat on laskettu käyttäen etäisyytenä 200 mm. Kuvaajasta nähdään, että kulma ei muutu lineaarisesti.

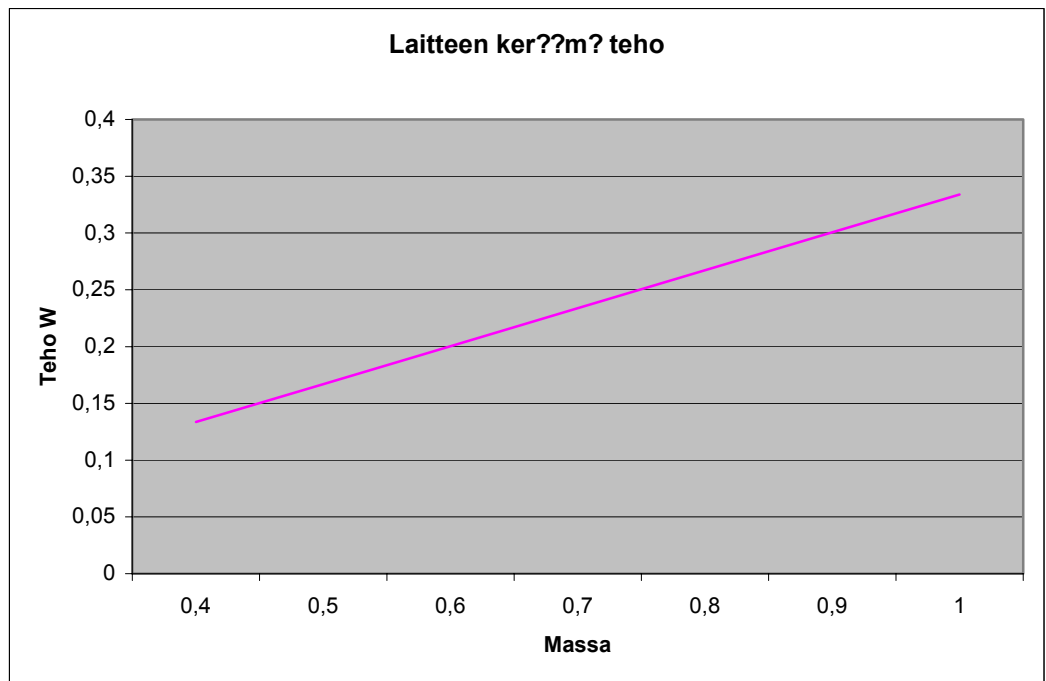


Kuvaaja 4. Säiliön ympyrän ja alatelineen etäisyyden vaikutus

Mikäli kovalla aallokolla, esimerkiksi myrskyllä, halutaan suojata laitetta, laite voidaan upottaa syvemmälle, jolloin siihen kohdistuu aallossa olevasta energiasta merkittävästi pienempi osuus. Silti laitteen aikaansaama kulma saadaan pysymään suurena.

#### 4.4.4 Massan vaikutus

Laitteen säiliön massan vaikutusta on kuvattu kuvaajassa 5. Kuvaajasta nähdään, että massan lisäys kasvattaa laitteen keräämää tehoa suoraviivaisesti.



Kuvaaja 5. Massan vaikutus laitteen keräämään laskennallisen tehoon.

## 5. YHTEENVETO

Yhteenvetona voidaan sanoa, että valitsemamme malli toimi testeissä odotuksiin nähden hyvin. Malli toteutti sille asetetun tavoitteen, eli se liikkui aallon mukana tehden ympyrämäistä liikettä. Testeissä ei laitetta kuormitettu lainkaan, koska sekä malli että käytetyt aallot olivat niin pieniä, että niissä oleva teho on hyvin pieni. Meillä ei ollut käytössä riittävän tarkkoja mittalaitteita. Testeissä ei myöskään testattu massan vaikutusta eikä varsien pituuksien vaikutusta. Tämä johtui siitä, että käytettävissä ollut testausaika oli hyvin rajallinen.

Laskelmissa testien jälkeen kuitenkin saatiin osoitettua, että varsinkin varsien pituuksien muutoksella on suuri vaikutus. Alavarren tekemää kulmaa saadaan kasvatettua huomattavasti, mikäli ylempi varsi on selvästi alavartta pidempi. Myös alatelineen ja säiliön välisellä etäisyydellä on suuri merkitys. Tätä voidaan käyttää hyödyksi, mikäli laitetta on tarve suojella kovalla aallokolla. Säiliötä tuotaessa alaspäin siihen kohdistuva energiamäärä pienenee jolloin se kestää aallokon paremmin. Kuitenkin käytettävissä oleva kulma kasvaa, joten pienemmälläkin energiamäärällä saadaan tuotettua sähköä.

## 6. LÄHTEET

- 1 <http://www.scubageek.com/>
- 2 <http://waveenergy.dk/>
- 3 <http://www.wavedragon.net/>
- 4 <http://www.mech.ed.ac.uk/>
- 5 Hepojoki Antti, Sähköpostikeskustelu 30.03.2005  
Teknillinen Korkeakoulu
- 6 Teknillinen virtausoppi, Willi Bohl  
Sonator