

Bølgeenergi

**Anders Leirvik
Torgeir Anda**

Prosjekt i FY1303 Elektrisitet og magnetisme høsten 2004

Abstract

Prosjektet gir en grundig innføring i enkelte prinsipper for å ta opp energi fra havbølger. Det er konstruert, fysisk eller bare teoretisk, mange ulike typer bølgeenergiabsorbatorer, såkalte WEC – wave energy converters. De mest sentrale WEC er oscillerende vannsøylar (OWC) og oscillerende bøyer. Innkommende bølger setter et legeme, enten en vannsøyle eller en flytende bøye i bevegelse, og det hydrauliske eller pneumatiske systemet inne i absorbatoren driver en turbin, som genererer en elektrisk strøm. Vi har her gjennomgått noen av disse.

Men det er ikke enkelt å utvinne energi fra havbølger, siden havbølger er irregulære bølger. Absorbert effekt fra en absorbator uten noen form for styring er meget liten i forhold til en som blir styrt. Da kommer vi inn på begrep som fase- og amplitudestyring, som er det mest sentrale i teorien om bølgeenergi. Den generelle teorien om fasestyring resulterer i at oscillasjonsfarten og kraften fra bølgene må være i fase for å gi størst mulig absorbert effekt i det oscillerende legemet. En må da finne måter å kontrollere WEC på, som er både energi- og kostnadseffektiv. Det er mange gode forslag fra ledende forskere, men teknologien er enda ikke utviklet nok til å drive bølgeenergiverk i stor skala. For å bedre forstå fase- og amplitudestyring har vi sett på en elektrisk analogi for en OWC – en elektrisk krets hvis komponenter tilsvarer størrelser i et mekanisk svingesystem. Det viser seg at denne analogien at oscillasjonsfarten og kraften fra bølgene ikke nødvendigvis må være i fase for å oppnå maksimal nyttig effekt, fordi det ikke er det oscillerende legeme, men en turbin som skal absorbere effekten.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning	- 04 -
2. Symboler	- 04 -
3. Forskjellige typer bølgeenergiabsorbatorer	- 06 -
3.1 OWC – oscillerende vannsøyle	- 06 -
3.2 Offshore WEC bøye	- 08 -
3.3 TAPCHAN	- 10 -
3.4 Wave dragon	- 11 -
4. Generell teori og fase- og amplitudestyring	- 13 -
5. Elektrisk analogi til fasestyring	- 17 -
6. Generator	- 24 -
7. Konklusjon	- 26 -
8. Kildehenvisninger	- 27 -
9. Vedlegg	

1. Innledning

Vi starter med å se på forskjellige typer bølgeenergiabsorbatorer, WEC (wave energy converters). Først en oscillerende vannsøyle, OWC (oscillating water column) installert ved kysten, deretter en oscillerende bøye med et hydraulisk system installert offshore, og to WEC som bygger på at bølgene slår over i et reservoar, TAPCHAN og wave dragon – den største forskjellen er at den ene er montert ved kysten og den andre er offshore. Hovedtyngden i denne delen ligger på to første, ettersom de er mer aktuelle for senere beregninger. TAPCHAN og wave dragon blir fremstilt for å vise at det er flere andre måter å utvinne bølgeenergi på. Vi sier også litt om hvordan absorbatorene må fase- og amplitudestyres.

Videre ser vi på teorien som ligger bak alle typer WEC. Vi ser på kreftene som virker på absorbatoren, og ut i fra det beregner vi hvordan vi kan oppnå maksimal absorbert effekt. Vi ser også på det som vil tilsvare maksimal absorbert effekt i en elektrisk analogi for en OWC.

Til slutt forteller vi enkelt hvordan en generator fungerer, og oppsummerer resultatene fra prosjektet.

2. Symboler

Symbol tillagt en subposisjonert 0 er amplituden til den fysiske størrelsen.

Brukt i 3.2 Offshore WEC bøyer og 4. Generell teori og fase- og amplitudestyring

$F(t)$ - total bølgekraft + ekstern kraft som følge av fasestyring

$F_e(t)$ - eksitasjonskraft, kraften som virker på legemet fra innkommende bølge

$F_r(t)$ - strålingskraft, kraft som virker på legemet fra bølger generert av oscillasjonen

$F_{tot}(t)$ - total bølgekraft: Eksitasjonskraft + strålingskraft

j - faseforskjell mellom eksitasjonskraft og kompleks oscillasjonsfart

$P(t)$ - absorbert effekt

$\overline{P(t)} = P$ - midlere absorbert effekt

P_e - effekt fra eksitasjonskraften

P_m - uttrykk for maksimal effekt, avhenger av faseforskjellen j

P_{max} - maksimal effekt som følge av fasestyring

P_r - effekt tapt på grunn av strålingsmotstanden

R_r - strålingsresistans, motstand fra genererte bølger

$s(t)$ - forskyvning til et legeme som følge av oscillasjon

u - kompleks oscillasjonsfart

u^* - komplekskonjugert oscillasjonsfart

$|u_0|_0$ - optimal fartsamplitude, avhenger av faseforskjellen j

$|u_0|_{opt}$ - optimal fartsamplitude som følge av amplitudestyring

Z_r - mekanisk strålingsimpedans

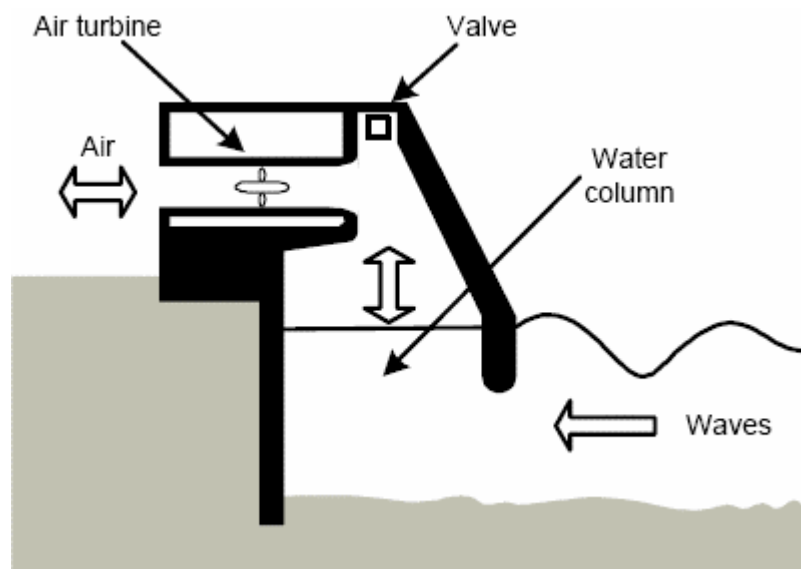
Brukt i 5. Elektrisk analogi til fasestyring

A_0	- kompleks amplitude til innkommende bølge
C_i	- kapasitanser
F_{tot}	- totalkraften på vannsøylen
$f_{e,I}$	- eksitasjonskraftskoeffisient
g	- tyngdens akselerasjon
I	- elektrisk strøm
L	- induktans
ω	- sirkelfrekvens
R_1	- resistans i kretsen som tilsvarer den mekaniske resistansen $R_{r,I} + R_f$
R_2	- resistans i kretsen analogt med absorbert energi
R_f	- friksjon
$R_{r,I}$	- strålingsresistans
r	- massetetthet til vann
$rgSs_0$	- oppdriftskraft
S	- overflaten på vannsøylen.
s_0	- kompleks amplitude for utsvinget til vannsøylen
U	- elektrisk spenning
u_0	- kompleks fartsamplitude
V	- spenning
Z_l	- mekanisk last impedans
Z_w	- reflektert impedans og friksjon
Z_{tot}	- total impedans i kretsen

3. Forskjellige typer bølgeenergiabsorbatorer

3.1 OWC – Oscillerende vannsøyle

En OWC består av et kammer hvor et volum med luft er innelukket over havoverflaten. Kammeret er åpent mot havet i en viss avstand under vannoverflaten. I de fleste tilfeller blir anvendbar energi produsert av en luftturbin som er plassert mellom luftkammeret og den ytre atmosfæren. En innkommende bølge vil tvinge vannsøylen under den innelukkede luften til å oscillere og dermed pumpe luft gjennom turbinen.



Figur 3.1.1. Prinsippskisse av en OWC

Kilde: <http://www.wave-energy.net>

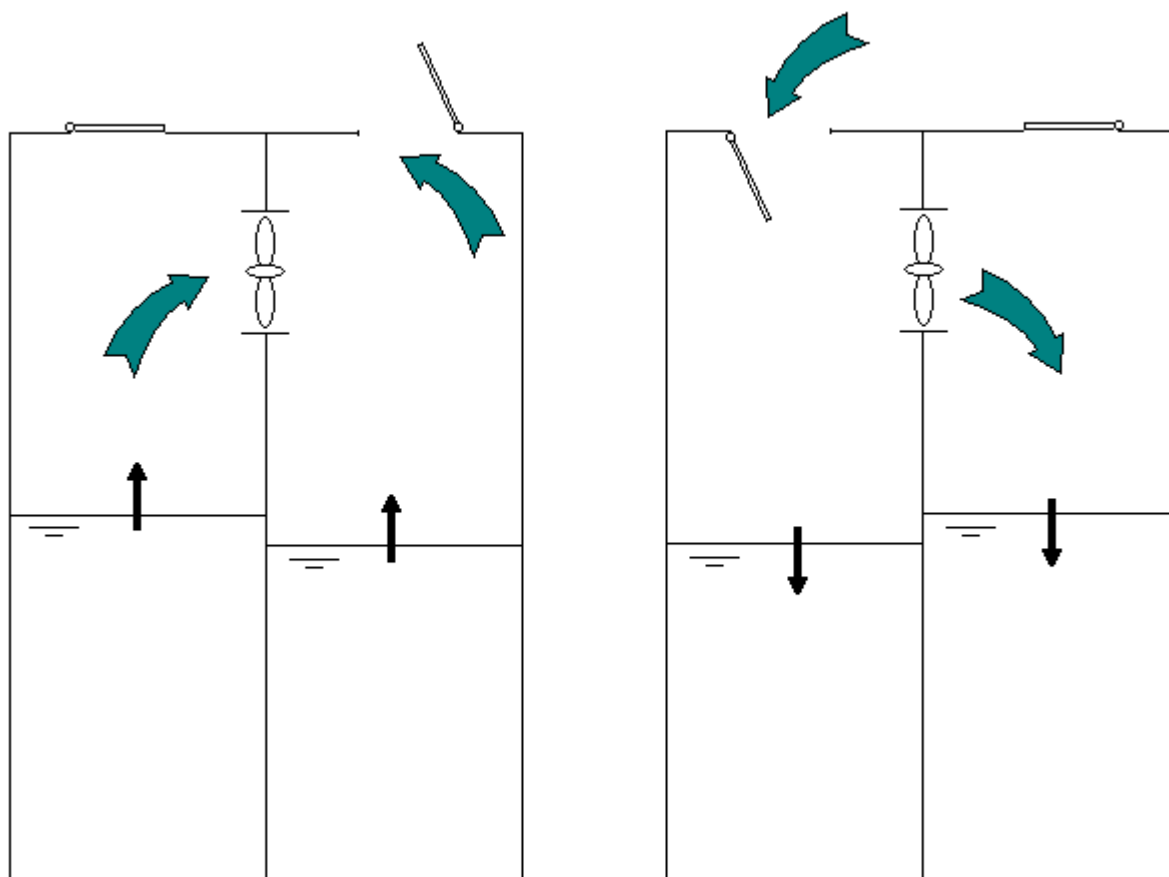
Gjennomstrømningen av luft gjennom turbinen vil forandre retning ettersom trykket i kammeret oscillerer. En vanlig propell vil under slike forhold stoppe opp for deretter å rotere andre veien. Siden trykket i kammeret hele tiden oscillerer, vil en slik propell hele tiden bremses og stoppes opp. Dette er lite gunstig når propellen skal kobles til en generator. Det finnes flere måter å løse dette problemet på. Den mest populære måten er Wellsturbinen oppfunnet for ca. 25 år siden av Dr. Allen Wells. Denne gjør bruk av en propell som roterer uavhengig av luftgjennomstrømningens retning.



Figur 3.1.2. Propell brukt i en Wells turbin.

Kilde: Havbølgjer: Energi og utnytting av J. Falnes og J. Hals

En annen mulig løsning er tvilling OWC. Ved å bruke to kammer vegg i vegg i stedet for ett tar denne modellen sikte på å få en konstant retning på luftgjennomstrømningen. Ved å bruke to luftluker, en i hvert kammer, kan det skapes et undertrykk i det ene kammeret og et overtrykk i det andre ved å åpne den ene luken når vannsøylene er på vei opp og åpne den andre når vannsøylen er på vei ned. Disse luftlukene brukes også til å fasestyre OWC.



Figur 3.1.3. Prinsipp for tvilling OWC med konstant luftgjennomstrømning i turbinen. Til venstre er vannsøylen på vei opp og til høyre er vannsøylen på vei ned.

Kilde: *An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters* av Arne Brendmo

Fasestyring av en OWC består i å kontrollere den svingende vannsøylen. Som med en bølge vil den svingende vannsøylen bli faseforskjøvet i forhold til eksitasjonskraften. I tilfellet med en bølge kan dette rettes opp igjen ved å holde igjen bøyen med en klype eller en annen mekanisk innretning. Siden vannsøylen ikke er massiv må andre teknikker brukes. Det vanligste er å styre lufttrykket i kammeret over vannsøylen. Ved å slippe ut luft når vannsøylen er på topp og dermed skape et undertrykk i kammeret vil den holdes fast eller sinkes ned. Tilsvarende kan oppnås når vannsøylen er på bunn ved å slippe inn luft og dermed skape overtrykk.

I Norge har det blitt bygget en OWC på Toftestallen i Øygarden, Hordaland. Arbeidet med denne ble startet i 1980 av Kværner Brug A.S. og den ferdige installasjonen sto klar i 1985. Dette var et prøveprosjekt som ble skrinlagt et par år etter at bølgeenergiverket ble satt ut av drift i 1988 på grunn av ødeleggelser fra storm.

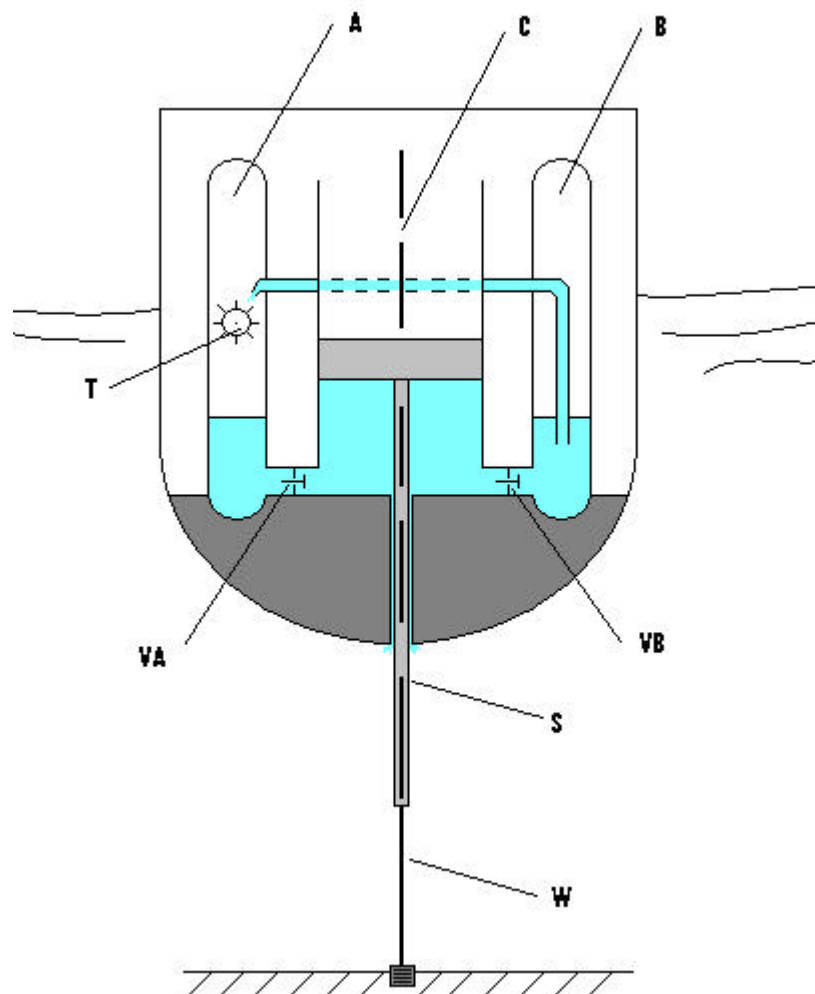
3.2 Offshore WEC bøye

OWEC bøyer er bøyer som er festet til havbunnen med en kabel. De oscillerer opp og ned som følge av bølger. Selv om det er flere forskjellige bøyer, hvor for eksempel geometrien har mye å si, er prinsippet omtrent det samme. Oscillasjonen fører til at det pumpes vann inn i bøyen, som ved hjelp av forskjellige teknikker benytter seg av gass- eller væsketrykk som driver en turbin. Det finnes også bøyer som bygger på OWC-prinsippet. Bøyene er relativt små for å få mest mulig absorbert effekt mot de økonomiske kostnadene, men det gjøres opp for ved å plassere ut mange små bøyer. Her skal vi se på et eksempel på en hydraulisk bøye, den første foreslått av Kjell Budal (1933-1989), tidligere professor ved NTNU.



Figur 3.2.1. Bøye sett fra over vann.

Kilde: <http://members.tripod.com/Interproject/>



Figur 3.2.2. Bøyen er festet til havbunnen med en kabel W , et stempel S inne i en hul sylinder C pumper vann fra A til B , V_A og V_B er luker som regulerer vannet og fasestyringen, A er en gassakkumulator med lavere trykk enn gassakkumulator B , T er en pelton turbin.

Kilde: *Some early proposals for offshore wave energy converters (1992)* av H. Eidsmoen og J. Falnes.

Denne modellen er av en sylinderformet bøye med en kuleformet bunn. Gasstrykket i akkumulator A er lavere enn gasstrykket i akkumulator B . Hvis begge lukene er stengt, vil bøyen være låst i en bestemt posisjon, hvis bare luke V_A er åpen, vil den flyte ved likevektspunktet, og hvis bare luke V_B er åpen vil den dras under likevektspunktet. Med andre ord, bøyens posisjon i forhold til likevektsposisjonen er avhengig av bølgekraften og kraften av trykket:

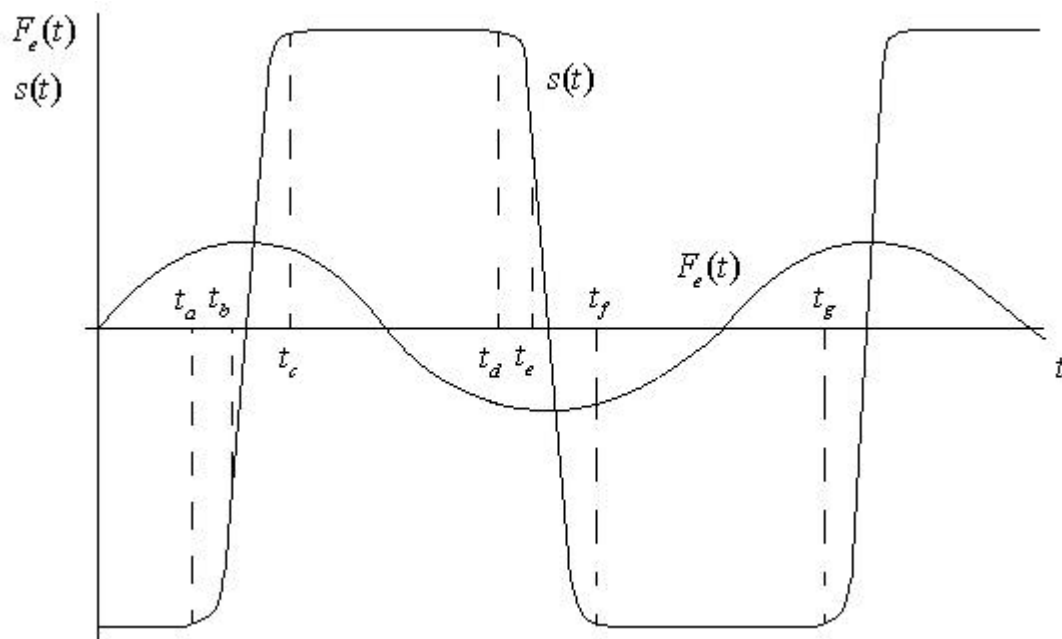
$$F(t) = F_{tot}(t) + F_p(t) \quad (3.2.1)$$

hvor trykkraften $F_p(t)$ er motsatt rettet bølgekraften $F_{tot}(t)$. Stempelet S fungerer da også som en demper for oscillasjonen. Lukene brukes nemlig ikke bare til å pumpe vannet fra A til B , men også til fasestyring.

Bøyen er festet til havbunnen med kabelen W . Stempelet S inne i den hule sylindren C pumper vann fra A til B . På grunn av at det er høyere gasstrykk i B enn i A , blir vannet presset ned i akkumulatoren, og da opp gjennom røret som leder vannet gjennom en pelton turbin og tilbake til akkumulator A . En pelton turbin er en helt vanlig turbin som for eksempel blir brukt i alle norske vannenergiverk.

Fase- og amplitudestyring oppnås ved hydraulisk låsing, se figur 3.2.3. Luke V_A og V_B åpnes og lukkes for å styre legemet. Bøyen er låst i en bestemt posisjon når begge lukene er lukket, fordi vannmengden inne i hovedakkumulatoren er konstant. Ved tid t_a er bøyen i sin nederste posisjon, V_A åpnes, og på grunn av trykkraften vil bøyen stige. Ved t_b lukkes V_A samtidig som V_B åpnes, og vi får større trykk som fører til at bøyen retarderer. Ved t_c er bøyen i sin øverste posisjon. Oscillasjonsfarten er lik null, noe som gjør at det krever lite energi for å låse bøyen. Dette gjøres ved å stenge begge lukene. Ved t_d åpnes V_B , og bøyen synker nedover. Ved t_e lukkes V_B , mens V_A åpnes. Trykkraften reduseres, og bøyen retarderer. Ved t_f er bøyen i sin nederste posisjon igjen, og låses. Ved t_g åpnes V_A , og prosessen gjentar seg.

Amplitudekontroll oppnås ved at vann transporteres fra akkumulator A til akkumulator B ved bevegelsen som sylindere utfører. Ut i fra figur 3.2.3 ser vi når V_A er åpen. Dempingen kan forandres ved å justere t_b og t_e .



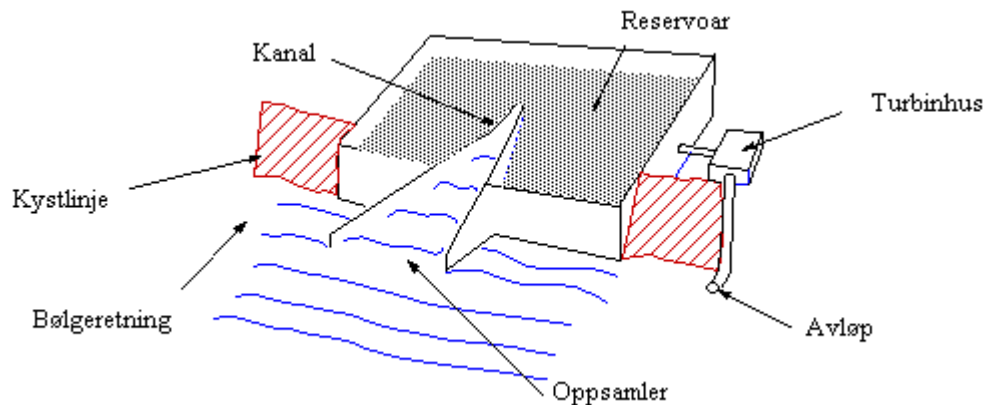
Figur 3.2.3. Bøyens forskyving $s(t)$ i forhold til likevektspunktet, og eksitasjonskraften $F_e(t)$ fra bølgen. Tidene for åpning og lukking av lukene er vist. (Eksitasjonskraften blir forklart under avsnitt 4.)

Kilde: *Some early proposals for offshore wave energy converters (1992)* av H. Eidsmoen og J. Falnes.

Tidene t_a til t_g er på denne figuren optimaliserte tider å operere fase- og amplitudestyringen på for en harmonisk bølge. Med havbølger, som er irregulære, er det som tidligere nevnt ikke like lett. Amplitude og bølgelengde må måles og predikeres av datamaskiner, og dempingen til bøyen må kunne styres raskere enn en bølgeperiode.

3.3 TAPCHAN

TAPCHAN står for Tapered Channel. Vann samles opp og konsentreres i en oppsamler, som gradvis blir en smalere og smalere kanal. Dette fører til at bølgeamplituden øker, og til slutt slår over i reservoaret, som ligger 3-4 meter over havoverflaten. Den kinetiske energien fra bølgene er omgjort til potensiell energi som lagres i reservoaret, som fører en jevn strøm av vann til en turbin ved trykket i reservoaret, og ut i havet igjen. Se figur 3.3.1.



Figur 3.3.1. Skisse over en TAPCHAN.

Kilde: http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint2.html

Teknikken er utviklet i Norge, og en TAPCHAN ble bygget nær Bergen i 1985 (se figur 3.3.2). Den fungerte bra i mange år, til den ble ødelagt under vedlikeholdsarbeid. På 1980-tallet var det planlagt å bygge ut flere TAPCHAN, spesielt på øya Java, men det ser ut til at teknologien gikk i glemmeboken. Det er grenser for hvor man kan plassere en TAPCHAN. Det kan ikke være store tidevannsforskjeller, og bølgene må være regulære. Ved store tidevannsforskjeller og irregulære bølger vil ikke reservoaret fylles kontinuerlig, og effekten blir meget redusert i forhold til kostnadene. Som nevnt ovenfor, fant man for eksempel ett sted hvor dette kunne fungert, på øya Java i Indonesia, men ingenting ble gjort.



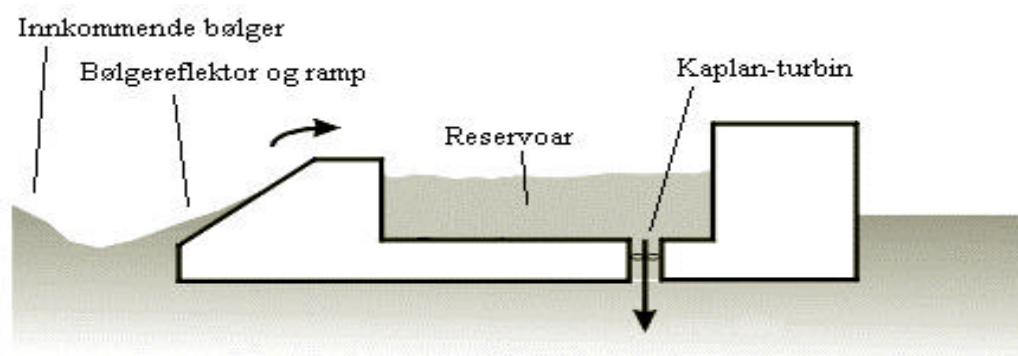
Figur 3.3.2. TAPCHAN ved Toftestallen nær Bergen.

Kilde: [http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20C%20-%20Research%20&%20Development\(11.1\).pdf](http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20C%20-%20Research%20&%20Development(11.1).pdf)

3.4 Wave dragon

Wave dragon er et dansk patent. Den fungerer på mange måter som en TAPCHAN, bortsett fra at dette er en offshore WEC (OWEC) som er slakt festet til havbunnen, i motsetning til TAPCHAN som er installert ved kystlinjen. Bølgene kommer inn mot to bølgereflektorer som konsentrerer dem mot en ramp. Bølgene slår over rampen, som for en TAPCHAN, og fyller et reservoar som er høyere enn havoverflaten. Trykket gjør at en turbin i bunnen av wave dragonen, av samme type som i en TAPCHAN, drives. For å suksessfullt utvinne energi, må

mang slike wave dragoner monteres på rekke og rad, og i følge forfatteren av artikkelen referert som kilde til dette avsnittet er denne en av de WEC som er best egnet til slik utnyttelse offshore.



Figur 3.4.1. Snitt av en wave dragon.

Kilde: http://wave-energy.net/Library/WaveDragon_dec_2000.pdf

4. Generell teori og fase- og amplitdestyring

Dette er basisgrunnlaget for teorien for bølgeenergiabsorbatorer (WEC). Vi ser på et legeme som bare oscillerer i z-retning, det vil si opp og ned. Vi kan da se bort i fra vektornotasjon. Samtidig ser vi på havbølgene som harmoniske bølger, noe vi ikke har i virkeligheten. Virkelighetens bølger er irregulære. Legemet absorberer energi fra bølgene. Bølgen presser på legemet med en kraft F_e som kalles eksitasjonskraften. Dette er den totale bølgekraften på overflaten til legemet. Når legemet oscillerer, genereres en utsendt strålingskraft F_r . Resultantkraften på legemet blir da

$$\begin{aligned} F_{tot}(t) &= F_e(t) + F_r(t) \\ F_{tot,0} e^{i\omega t} &= F_{e,0} e^{i\omega t} + F_{r,0} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Når vi stryker tidsavhengigheten $e^{i\omega t}$ kan vi skrive reaksjonskraften på denne formen med kompleks amplitude

$$F_{r,0} = -Z_r u_0 \quad (4.2)$$

hvor $Z_r = R_r + iX$ er mekanisk strålingsimpedans, og u_0 er den komplekse fartsamplituden til legemet. $R_r = \text{Re}(Z_r)$ er motstanden fra genererte bølger: Når legemet oscillerer, genererer det nye bølger som motvirker eksitasjonskraften.

Strålingsimpedansen avhenger av sirkelfrekvensen ω og geometrien til legemet.

$$F_{tot,0} = F_{e,0} - Z_{r,0} u_0 \quad (4.3)$$

Effekten absorbert av legemet er

$$P(t) = F_{tot} u(t) \quad (4.4)$$

Absorbert effekt over et tidsintervall blir,

$$\begin{aligned} P &\equiv \overline{P(t)} \\ &= \left(\frac{F_0}{2} e^{i\omega t} + \frac{F_0^*}{2} e^{-i\omega t} \right) \left(\frac{u_0}{2} e^{i\omega t} + \frac{u_0^*}{2} e^{-i\omega t} \right) \\ &= \frac{1}{4} (F_0 u_0^* + F_0^* u_0 + F_0 u_0 e^{2i\omega t} + F_0^* u_0^* e^{-2i\omega t}) \end{aligned}$$

(De to siste leddene er hverandres komplekskonjugerte og har samme vinkelfrekvens, slik at summen har et tidsmiddel lik null.)

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{F_{tot} u_0^*\} = \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{2} F_{e,0} u_0^* + \frac{1}{2} Z_r u_0 u_0^*\right\} \\
&= \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{F_{e,0} u_0^*\} - \frac{1}{2} R_r u_0 u_0^* \\
&= P_e - P_r
\end{aligned} \tag{4.5}$$

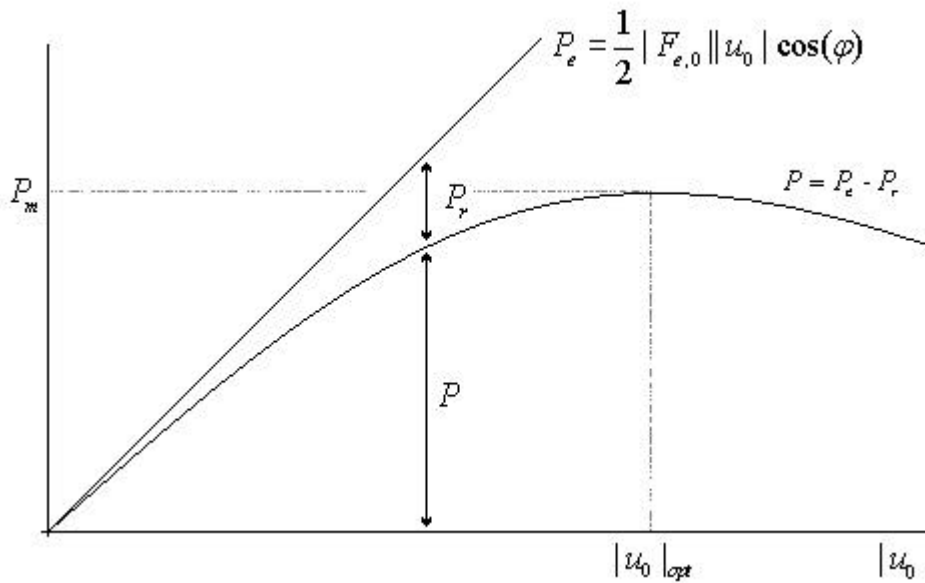
Eksitasjonseffekten

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{F_{e,0} u_0^*\} = \frac{1}{2} |F_{e,0}| |u_0| \cos(j) \tag{4.6}$$

er den totale effekten fra bølgene (hvor j er faseforskjellen mellom kraft og fart), mens

$$P_r = \frac{1}{2} R_r |u_0|^2 \tag{4.7}$$

representerer effekt reflektert fra legemet.



Figur 4.1. Absorbert effekt P som funksjon av oscillasjonsfarten (parabel). Reflektert effekt P_r er differansen mellom eksitasjonseffekten (rett linje) og den absorberte effekten.

Kilde: *Some early proposals for offshore wave energy converters (1992)* av H. Eidsmoen og J. Falnes.

Fra ligningene (4.5) og (4.6) får vi total absorbert effekt,

$$P = P_m = \frac{|F_{0,e}|}{8R_r} \cos^2(j) \tag{4.8}$$

og tilsvarende optimal fartsamplitude,

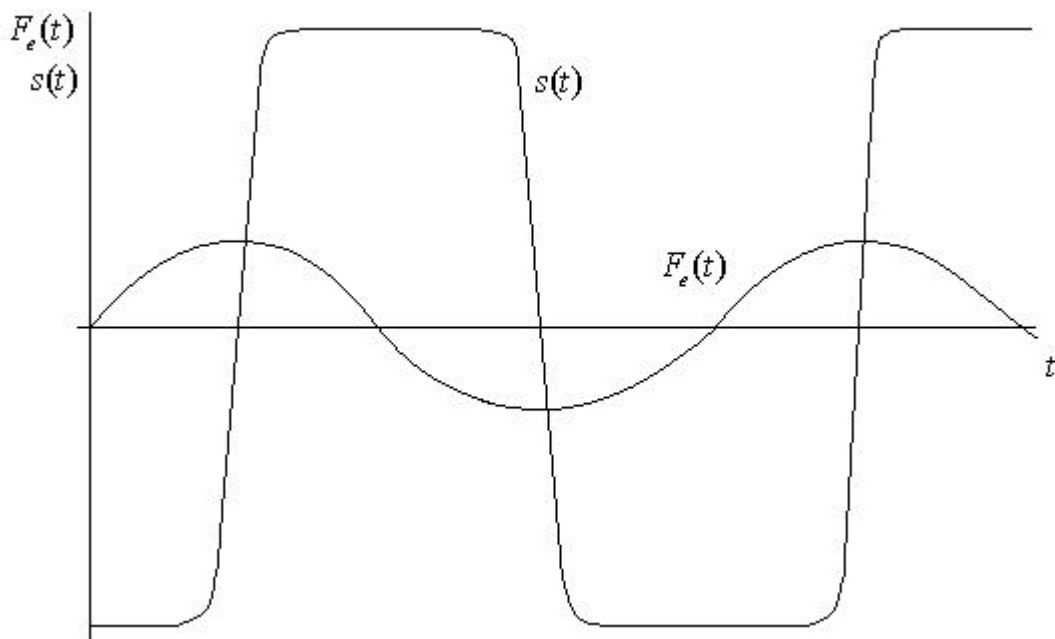
$$|u_0|_o = \frac{|F_{0,e}|}{2R_r} \cos(j) \quad (4.9)$$

Størrelsen j er som nevnt faseforskjellen mellom eksitasjonskraften og oscillasjonsfarten. Fra ligningene (4.8) og (4.9) ser vi at vi får maksimal effekt ved $j = 0$, slik at $\cos^2(j) = 1$. Eksitasjonskraften og oscillasjonsfarten er da i fase, og vi får resonans:

$$P_{\max} = \frac{|F_{e,0}|}{8R_r} \quad (4.10)$$

$$|u_0|_{opt} = \frac{|F_{e,0}|}{2R_r} \quad (4.11)$$

Ut i fra denne generelle teorien bak alle typer WEC kan vi trekke én enkel konklusjon. Oscillasjonsfarten og eksitasjonskraften må være i fase for å oppnå maksimal effekt. Dette styres enklest ved å påføre en ytre kraft på legemet. En kan påføre en kraft kontinuerlig, slik at legemet hele tiden er i optimal fase og amplitude, men dette er vanskelig. Det er lettere å låse legemet for diskrete tidspunkt, se figur 4.2.



Figur 4.2. Legemets forskyving $s(t)$ i forhold til likevektspunktet, og eksitasjonskraften $F_e(t)$ fra bølgen. Her har vi harmoniske bølger. Dette legemet er perfekt fase- og amplitudestyrt. Legg merke til at forskyvningen av legemet og eksitasjonskraften har en faseforskjell $j = \pi/2$. Om en deriverer forskyvningen, får vi oscillasjonsfarten, som er i fase med kraften. Kilde: *Some early proposals for offshore wave energy converters* (1992) av H. Eidsmoen og J. Falnes.

Figur 4.2 representerer en bølge som oscillerer i havet. Det er flere måter å holde igjen og slippe løs på, men det er ikke så viktig akkurat nå. Én måte er forklart under avsnitt 3.2.

Ut i fra denne figuren ser vi at når oscillasjonsfarten til legemet er positiv, er også eksitasjonskraften rettet i positiv retning. Det samme gjelder for negativ retning. Oscillasjonsfarten og eksitasjonskraften er dermed i fase. Som tidligere regnet ut, er dette

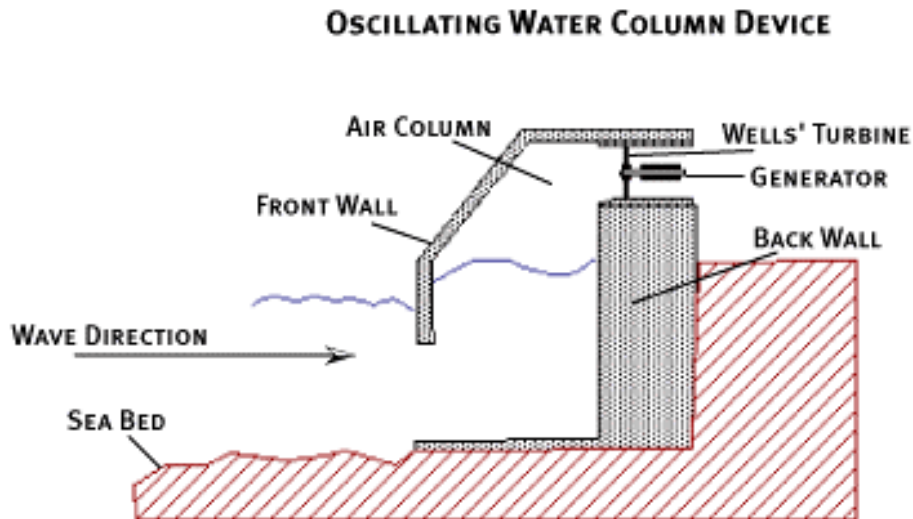
gunstig fordi en større del av eksitasjonseffekten blir absorbert enn om de hadde pekt i forskjellige retninger. Uten denne fasestyringen ville legemets treghet ført til at legemet retarderte, og absorbert effekt ville blitt mye mindre.

Legemet er også amplitudestyrt. Ved å holde igjen og slippe løs legemet ved korrekte tider kan vi oppnå maksimal amplitude, se figur. Legemet låses når det er ved toppen av bevegelsen, det vil si når den deriverte av forskyvningen, farten, er lik null. Da brukes minst energi for å stoppe legemet. Legemet slippes igjen slik at det holdes i fase. Legemet er nå langt over bølgen, og får da en større fart ned mot bølgedalen. Det samme skjer igjen, bortsett fra at nå låses legemet i bunnen av bevegelsen, og holdes nesten helt til bølgen er ved et nytt toppunkt. Den slippes for så å raskt nå et nytt toppunkt. Dette kan gi en ekstrem amplitude for legemets oscillasjon i forhold til bølgens amplitude.

Fase- og amplitudestyring er den store utfordringen. Hadde havbølgene vært regulære harmoniske bølger, ville ikke dette vært noe problem. Men siden bølgene kommer inn med forskjellige bølgelengder og amplituder, vil en WEC uten fase- og amplitudestyring ikke være spesielt effektiv. En bruker dataprogram til å måle og forutse innkommende bølger, men vi mangler likevel kunnskap for å utnytte dette maksimalt.

5. Elektrisk analogi til fasestyring

Vi skal i denne delen se på dynamikken i en OWC som ikke er fasestyrt. Vi skal prøve å identifisere kreftene som er involvert for deretter å sette opp et mekanisk ekvivalent system. Dette diagrammet skal vi igjen omforme til et elektrisk ekvivalent system. Til slutt vil vi prøve å forklare fasestyring i en OWC ved å se på det elektrisk ekvivalente systemet.



Figur 5.1. Prinsippskisse av en OWC uten fasestyring

Kilde:

<http://www.cwru.edu/pubs/cwrumag/spring2002/departments/worldview/images/wave03.gif>

I den litteraturen vi har studert angående OWC (An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters av Arne Brendmo) er kreftene som virker på den oscillerende vannsøylen i dette tilfellet beskrevet ved følgende ligning som er Newtons andre lov i ny forkledning:

$$F_{0,tot} = f_{e,l}A_0 - Z_w u_0 - r g S s_0 = Z_l u_0 \quad (5.1)$$

I Brendmo sin bok er denne beskrivelsen kalt modell 1. Det som karakteriserer denne forenklete modellen er at vannsøylen blir betraktet som et masseløst stivt legeme. I Newtons andre lov fungerer massen som en koeffisient foran akselerasjonen. Her er massen lik null, men et begrep tilleggsmasse blir introdusert, og denne tilleggsmassen fungerer som en koeffisient foran farten og ikke akselerasjonen. Denne måten å tolke den fysiske situasjonen på fører med seg en del ny teori fra hydrodynamikken. Blant annet vil det være mulig for et gitt legeme å ha akselerasjon selv om totalkraften på legemet er lik null. Dette fordi også massen er null.

$$\Sigma F = m \cdot a \quad (5.2)$$

Som med innsatt totalkraft og masse gir:

$$0 = 0 \cdot a$$

Som vi ser fra formelen kan vi da ha en akselerasjon uten en totalkraft ulik null.

Vi skal ikke prøve å forklare systemet fullt ut ved denne teorien, men i alle fall prøve å identifisere alle leddene i formelen og rettferdiggjøre deres mekaniske og elektriske ekvivalenter.

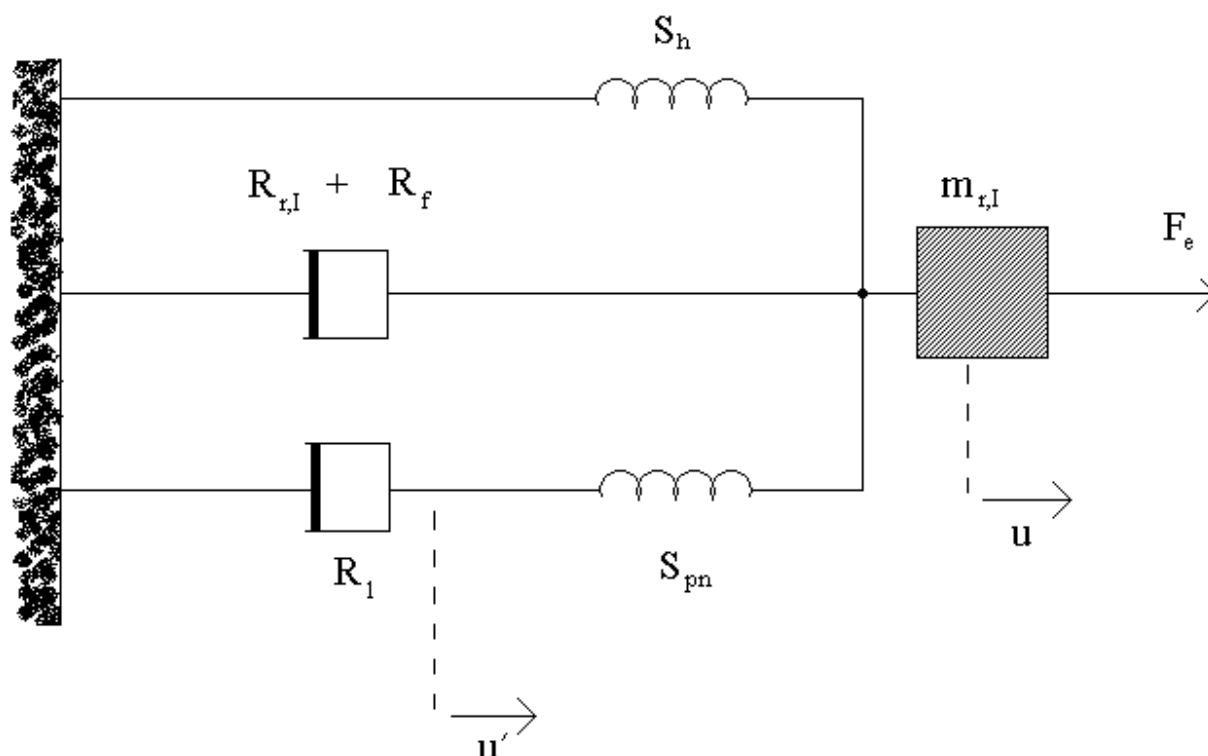
$f_{e,I}$ er eksitasjonskraftskoeffisienten og A_0 er den komplekse amplituden til innkommende bølge. Sammen utgjør disse eksitasjonskraften som er kraften på vannsøylen fra innkommende bølge. I den mekaniske analogien vil denne kraften tilsvare en ytre påtrykt kraft F_e , som virker på tilleggsmassen. Og i den elektriske analogien tilsvare den påtrykte spenningen i en krets.

$Z_w = Z_{r,I} + R_f$. Her representerer R_f tap av energi i systemet på grunn av friksjon mellom vann og vegg, og vann og luft. $Z_{r,I}$ er reflektert impedans. Denne kan deles i en reaktiv del, som vil påvirke vannsøylens fase, og en resistent del, som vil gi tap av energi i systemet. Den reaktive delen er i den mekaniske analogien tolket som en masse med treghet $m_{r,I}$, mens energitapet er representert i en mekanisk motstand $R_{I,r} + R_f$ som vi heretter slår sammen til én resistans, R_I . I den elektriske analogien vil tilleggsmassen være erstattet med en induktans som fungerer som en treghet i kretsen, mens den mekaniske motstanden er erstattet med en elektrisk motstand.

$r g S s_0$ er kun en reaktiv del som beskriver den hydrodynamiske stivheten til vannsøylen. r er massetettheten til vann. g er tyngdens akselerasjon. S er vannsøylens overflate og s_0 er avstanden fra vannsøylens minimale utslag til vannsøylens maksimale utslag. Vi kan tolke dette leddet som en slags potensiell energi i systemet (fordi dette leddet ikke tapper noe energi fra systemet) og representerer det ved en fjær S_h i den mekaniske analogien. I den elektriske analogien representerer vi det ved en kondensator.

Z_I inneholder en reaktiv del og en resistent del. Den reaktive delen svarer til luftsøylens kompresjon og ekspansjon. Den vil på samme måte som den hydrodynamiske stivheten kunne tolkes som en potensiell energi og blir også, som den hydrodynamiske stivheten representert ved henholdsvis en fjær, S_{pn} og en kondensator. Den resistente delen er energien som blir tappet fra systemet i turbinen og beskrives ved en mekanisk eller en elektrisk motstand, R_2 .

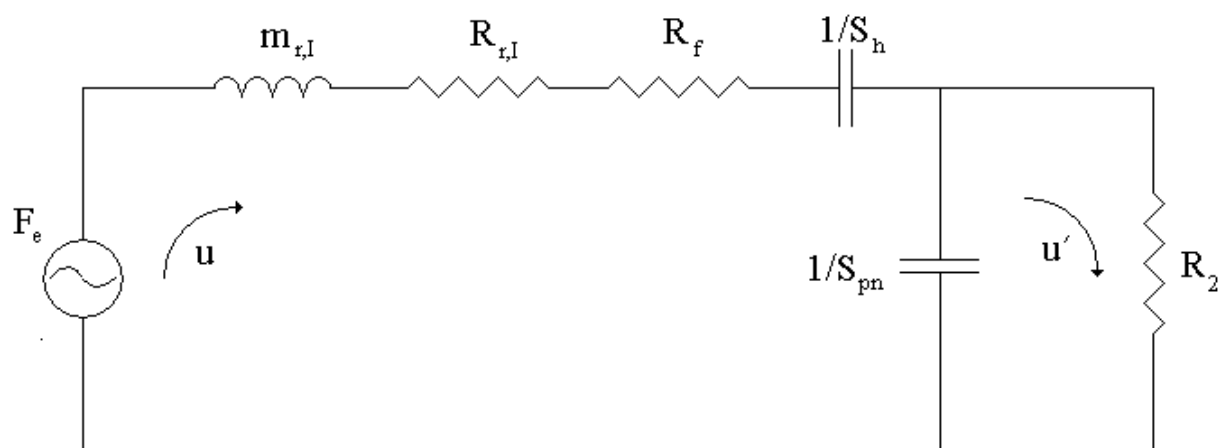
u_0 er den komplekse fartsamplituden til vannsøylen. Det vil si det maksimale utslaget for vannsøylens fart opp og ned i kammeret. I den mekaniske analogien vil denne størrelsen tilsvare fartsamplituden til tilleggsmassen. Og i den elektriske analogien svare til strømstyrken i kretsen.



Figur 5.2. Mekanisk ekvivalent system.

Kilde: *An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters* av Arne Brendmo

Krefter som virker selvstendig på det oscillerende legemet er koblet i parallell, mens krefter som virker sammen på den oscillerende massen er koblet i serie. Dette er rimelig. Hvis fjæren koblet i serie med R_1 er veldig slakk vil ikke R_1 ha noen innvirkning på systemet, som kan tilsvare at luftkammeret ikke er lukket, og ingen luft vil gå gjennom turbinen. De andre kreftene vil kun virke som en følge av bevegelsen til massen.



Figur 5.3. Elektrisk ekvivalent system.

Kilde: *An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters* av Arne Brendmo

Impedanser som virker selvstendig med strømmen er koblet i serie, mens impedanser som virker sammen med strømmen er koblet i parallell. Her kan vi igjen se på tilfellet hvor luftkammeret er åpent som tilsvarer en uendelig stor verdi for kondensatorer koblet i parallell.

Dette vil medføre at ingen strøm går igjennom R₂ slik at den ikke har innvirkning på strømmen.

Ved å innføre symboler vi er vant med fra elektrisitetstlæren kan vi skrive opp impedansen i kretsen ved bruk av kretssymboler slik:

$$\begin{aligned} Z_{tot} &= Li\omega + R_1 + \frac{1}{i\omega C_1} + (i\omega C_2 + \frac{1}{R_2})^{-1} \\ Z_{tot} &= Li\omega + R_1 - \frac{i}{\omega C_1} + \frac{R_2}{R_2 i\omega C_2 + 1} \\ Z_{tot} &= Li\omega + R_1 - \frac{i}{\omega C_1} + \frac{R_2 - R_2^2 i\omega C_2}{(R_2 \omega C_2)^2 + 1} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Symbolene vi har innført er L for induktansen, C₁ for kondensatoren koblet i serie og C₂ for kondensatoren koblet i parallell.

Slik vi har forstått resonans i elektromagnetismen er det når den imaginære delen av impedansen er lik null:

$$\text{Im}(Z_{tot}) = L\omega - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{R_2^2 \omega C_2}{(R_2 \omega C_2)^2 + 1} = 0 \quad (5.4)$$

Vi kan forstå dette ved å se på følgende relasjon, hvor R er resistans og X reaktans:

$$|I_0| = \frac{V_0}{|Z_{tot}|} = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (5.5)$$

Vi ser at ligning (5.5) går over til $|I_0| = \frac{V_0}{R}$ når X = 0 som har gitt maksimal amplitude for strømmen i kretser vi har jobbet med tidligere i år. Det som imidlertid er interessant å legge merke til er at ved å endre C₂ så vil også realdelen av impedansen endres, dvs. resistansen.

Dette på grunn av leddet $\frac{R_2 - R_2^2 i\omega C_2}{(R_2 \omega C_2)^2 + 1}$ som er bidraget fra parallellkoblingen. Mer kvalitativt

kan vi si at dette kommer av at strømstyrken gjennom R₂ endres som en følge av at C₂ endres. Dette virker rimelig. Hvis C₂ er stor kan mye ladning lagres på kondensatoren og dermed mindre strøm gå gjennom R₂. På samme måte kan vi forestille oss at vi ved å slippe mye luft inn og ut av luftkammeret vil mindre luft gå igjennom turbinen. I denne sammenheng må det presiseres at denne modellen ikke tar høyde for å slippe inn og ut luft, men kun ser på tilfellet hvor luften er lukket inne slik at luftkompresjonen kun vil påvirke vannsøylens fase, men ikke vil gi noe energitap.

Siden C₂ også påvirker kretsens resistans kan det tenkes at en verdi av C₂ som vil gi resonans slik vi har forstått begrepet tidligere ikke nødvendigvis vil gi den største amplituden for strømmen, hvis for eksempel denne verdien av C₂ gir en høy verdi av R. I teoridelen om fasestyring regnet vi oss frem til at eksitasjonskraften og oscillasjonsfarten måtte være i fase, det vil si den påtrykte spenningen og strømmen i den elektriske kretsen, for å få størst mulig absorbert effekt i det oscillerende legemet. Det vi imidlertid ser her er at vi i alle fall ikke nødvendigvis må få størst amplitude for strømmen når denne er i fase med spenningen. Men

kan det i stedet være slik at maksimal absorbert effekt vil sammenfalle med $\text{Im}(Z_{\text{tot}}) = 0$, dvs. når spenningen er i fase med strømmen?

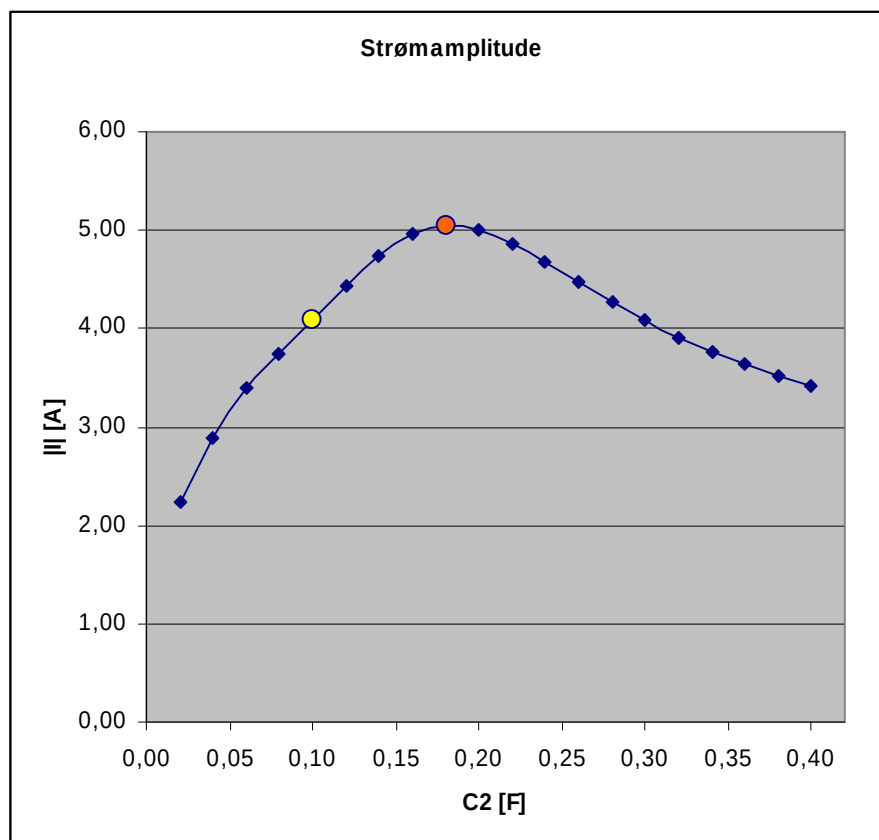
Midlere effekt i en elektrisk krets kan skrives som:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} R \cdot |I_0|^2 \quad (5.6)$$

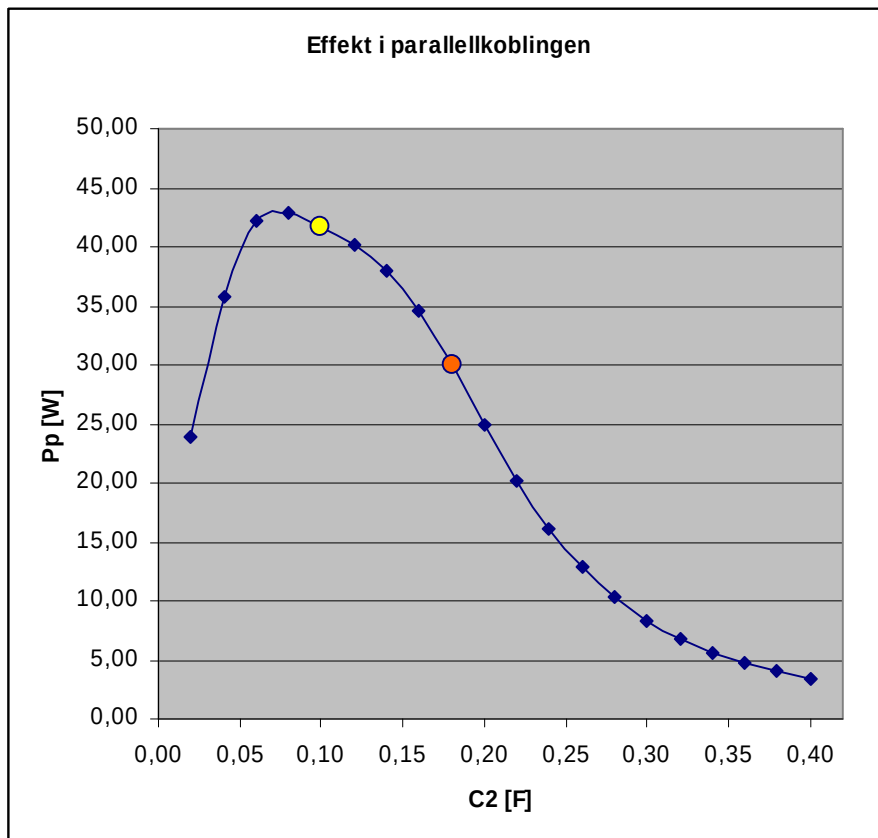
Når vi regner ut midlere effekt i R_2 bruker vi strømamplituden i kretsen og ikke strømmen gjennom R_2 , og vi bruker resistansen i parallellkoblingen og ikke R_2 selv. Da får vi

$$\langle P_{R_1} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}(Z_l) \cdot |I_0|^2 \quad (5.7)$$

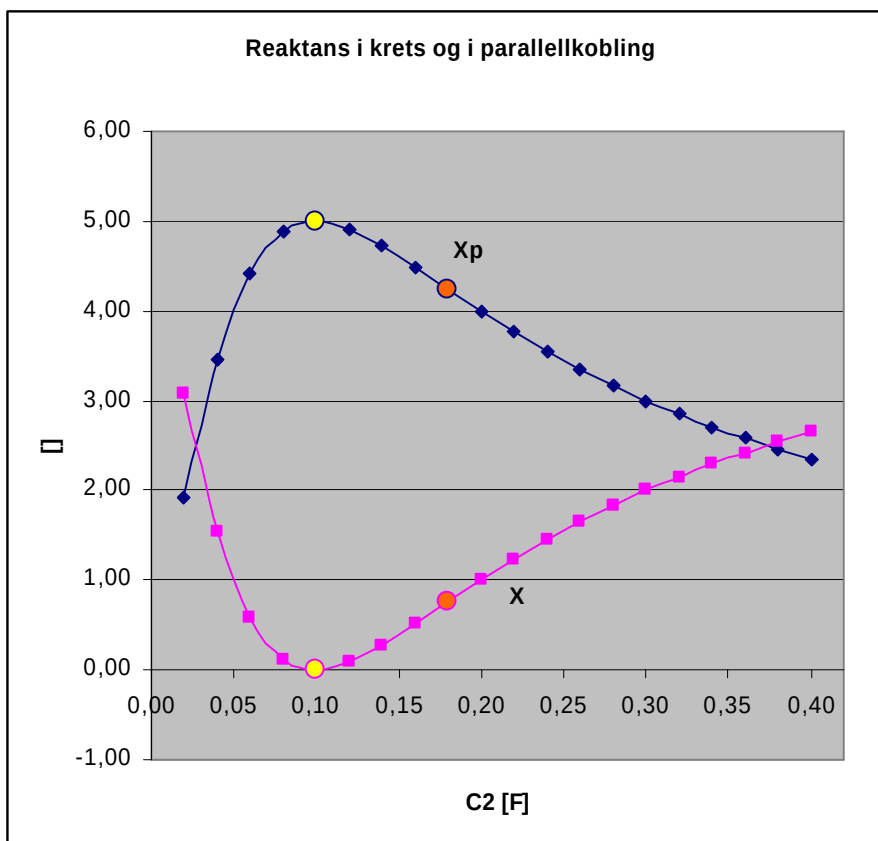
Vi ønsker å finne ut når midlere effekt i R_2 er størst. Det som imidlertid medfører mye komplisert regning, er å finne et eksplisitt uttrykk for denne effekten for deretter å derivere dette for å finne en maksimumseffekt. Det vi i stedet har gjort er å skrive inn uttrykkene for forskjellige størrelser: strømamplitude $|I_0|$, resistans i parallellkobling R_p , midlere effekt i R_2 $\langle P \rangle_{R_1}$, reaktans i parallellkobling X_p og reaktans i kretsen X , for deretter å teste forskjellige verdier av C_2 (med et tilhørende sett med parametre for de andre kretskonstantene) og se om dette gir noen fornuftig sammenhenger.



Figur 5.4. Strømamplitude vist som funksjon av C_2 .



Figur 5.5. Effekt i parallellkoblingen vist som funksjon av C_2 .



Figur 5.6. Reaktans i krets og i parallellkobling begge vist som funksjon av C_2 .

I grafene markerer det gule datapunktet minimumsverdien for kretsen reaktans og det orange datapunktet maksimumsverdien for strømamplituden. Det vi i utgangspunktet ønsket var en sammenheng mellom midlere effekt i R_2 og strømamplituden og/eller kretsens reaktans. Med en mindre fin inndeling på x-aksen fikk vi faktisk akkurat det vi hadde mistanke om at vi skulle få, nemlig et samsvar mellom maksimal effekt i R_2 og en reaktans i kretsen lik null. Dette ville i så fall vært helt i samsvar med den teorien vi allerede har etablert for fasestyring. Men ved å se på et mindre intervall på x-aksen og samtidig dele opp i flere datapunkter kan vi se fra grafene at effektmaksimum er forskjøvet litt til venstre for hvor reaktansen er lik null.

Ved å teste med forskjellige verdier av parameteren R_1 ser vi at når R_1 går mot null vil effektmaksimum samsvare med en reaktans lik null (dette virker rimelig ettersom da R_2 representerer det eneste effekttapet i kretsen). Hvis vi lar R_1 øke mye vil effektmaksimum flytte seg litt lenger til venstre, mens reaktanskurvene er de samme siden de ikke er avhengig av R_1 . Ved å forandre de andre parametrene ser vi at effektmaksimum alltid ligger litt til venstre for hvor reaktansen i kretsen er lik null. Vi tolker det dit hen at det er en sammenheng mellom effektmaksimum og nullpunktet for reaktansen selv om den ikke er like entydig som i den første modellen.

Så hva skyldes avviket?

Vi tror avviket har å gjøre med at modellene vi har brukt for å diskutere henholdsvis fasestyring og den elektriske analogien er litt forskjellige. En viktig forskjell på de to modellene er at den første modellen ser på absorbert effekt i det oscillerende legeme, mens det i den andre blir komplisert ved at det oscillerende legeme (vannsøylen) må vekselvirke med luftsøylen som igjen må vekselvirke med turbinen som absorberer effekten. I tillegg har vi heller ikke fullstendig oversikt over overgangen fra en WEC til en elektrisk krets. Vi så jo blant annet hvor viktig parameteren R_1 var for forskyvningen av effektmaksimum i forhold til reaktansens nullpunkt. Og hvordan denne parameteren er bestemt i en OWC er det vanskelig for oss å si noe om.

I en OWC er alle parametre utenom lufttrykket bestemt av konstruksjonen og omgivelsene. I vårt elektrisk ekvivalente system tilsvarer lufttrykket kondensatoren C_2 . Denne kondensatoren kan i det elektrisk ekvivalente systemet tilpasses slik at reaktansen i kretsen blir null og vi får noe som ligger "nær" maks effekt i R_2 . Vi tolker dette dit hen at lufttrykket i en OWC hvis tilpasset riktig også kan gi en total reaktans i systemet lik null og dermed få "nær" maks effekt til turbinen. I praksis må det taes høyde for to ting som vi ikke har gått inn på i vår oppgave.

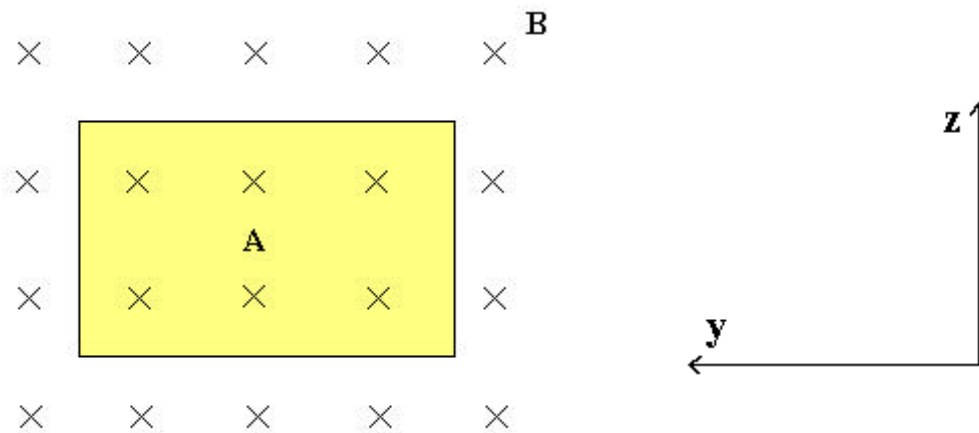
Den ene tingen som vi har nevnt allerede, å justere lufttrykket, medfører i de modeller vi har sett på, å slippe luft inn og ut av kammeret. Siden dette vil, så langt vi forstår, gi et energitap i systemet, kan det dukke opp uforutsette konsekvenser.

Den andre tingen er hvordan effekten er fordelt på turbinen. Dette la professor Falnes stor vekt på da vi snakket med han fordi det kan få store konsekvenser når den teoretiske modellen skal settes ut i praksis. Blant annet vil en levert effekt til turbinen med store maksimum kreve en turbin som kan ta opp store effekter. En turbin som kan absorbere stor effekt er mer kostbar enn en som kan absorbere mindre effekt. Derfor er det ikke særlig gunstig å ha voldsomme utslag for effekten hvis den høye effekten ikke er stabil. Da er det bedre å ha en mer stabil effekt selv om den gjennomsnittlig er litt mindre.

6. Generator

Vi skal i denne delen kort forklare hvordan man kan bruke et roterende legeme til å produsere en vekselspenning. Det roterende legemet vil i en WEC for eksempel være en propell i en turbin (OWC).

For å forklare dette tar vi utgangspunkt i en rektangelformet elektrisk leder plassert i et homogent magnetfelt $\mathbf{B}$, som står normalt på arealet den elektriske lederen omslutter.



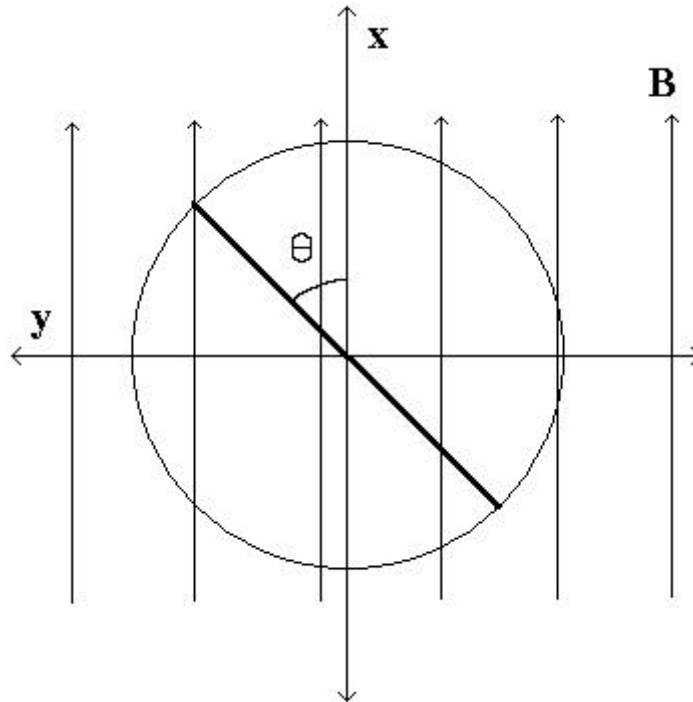
Figur 6.1. Et Areal $\mathbf{A}$ omsluttet av en elektrisk leder plassert i et magnetfelt $\mathbf{B}$, normalt på arealet eller parallell med $\mathbf{A}$.

Vi kjenner til sammenhengene:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \quad (6.2)$$

Fra disse sammenhengene ser vi at ved å endre $\mathbf{B}$ eller $\mathbf{A}$ vil det genereres en spenning. Hvis nå $\mathbf{B}$ peker i positiv x-retning kan vi tenke oss at den elektriske lederen roterer rundt z-aksen. Da vil arealet $\mathbf{A}$, som $\mathbf{B}$ feltet går gjennom variere med vinkelfrekvensen på følgende måte, hvis vinkelen $q = \omega t$ er i forhold til x-aksen:



Figur 6.2. Den elektriske lederen dreier om z-aksen med en vinkel ω i forhold til x-aksen slik at A hele tiden står normalt på z-aksen.

$$A(t) = A \cdot \sin(\omega t) \quad (6.3)$$

Hvis nå den roterende propellen i en turbin er koblet til en elektrisk leder lik den vi har sett på, og får denne til å rotere vil det induseres en spenning i den elektriske lederen:

$$e = -\omega B \cdot A \cdot \cos(\omega t) \quad (6.4)$$

Den elektriske lederen kan så i sin tur kobles til en elektrisk krets som nå kan levere en tidsavhengig vekselstrøm.

7. Konklusjon

Vi har sett på to hovedtyper bølgeenergiabsorbatorer, en OWC og en oscillerende bølge. Hva som kan sies om begge to er at de er helt avhengige av fase- og amplitudekontroll for å være kostnadseffektive i bruk. For at det oscillerende legeme i en WEC skal absorbere maksimal effekt må oscillasjonsfarten og eksitasjonskraften være i fase, som en ser av ligning (4.6). I en OWC som er et mer komplisert system, har vi kommet frem til at vilkårene for maksimal absorbert effekt ikke lar seg uttrykke like enkelt, siden det ikke er det oscillerende legemet, men en turbin som skal absorbere effekten.

Denne styringen av WEC er utfordringen til fremtidens forskere. Vi har opparbeidet en del kunnskap, men vi mangler fremdeles mye. Ikke bare kunnskap i fysikk, men også avansert teknologi som styrer fase- og amplitudestyringen.

Bølgeenergi er en miljøvennlig og fornybar energikilde, og et meget godt alternativ til dagens forurensende og ufornybare energikilder. Det er derfor viktig å forske på denne teknologien. Norge er et ledende land innen denne typen forskning. Kjell Budal startet denne type forskning på NTNU i 1973, og fikk senere følge av Johannes Falnes.

8. Kildehenvisninger

3.1 OWC - oscillerende vannsøyle

An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters av Arne Brendmo

Havbølger: Energi og utnytting av J. Falnes og J. Hals

<http://www.wave-energy.net>

3.2 Offshore WEC bøye

Some early proposals for offshore wave energy converters (1992) av Eidsmoen og Falnes

Budal's latching-controlled-buoy type wave-power plant (2003) av Falnes og Lillebekken (publisert i 5th European Wave Energy Conference 2003, paper H1)

[http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20B%20-%20Generic%20Technologies\(11.1\).pdf](http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20B%20-%20Generic%20Technologies(11.1).pdf)

3.3 TAPCHAN

[http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20C%20-%20Research%20&%20Development\(11.1\).pdf](http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet%20Section%20C%20-%20Research%20&%20Development(11.1).pdf)

http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint2.html

3.4 Wave dragon

http://wave-energy.net/Library/WaveDragon_dec_2000.pdf

4. Generell teori og fase- og amplitudestyring

Some early proposals for offshore wave energy converters (1992) av Eidsmoen og Falnes

Ocean waves and oscillating systems (2002) (side 18) av J. Falnes

5. Elektrisk analogi

An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters av Arne Brendmo

Vedlegg til prosjekt om bølgeenergi høsten 2004

U [V]	10,00
L [H]	10,00
w [rad/s]	1,00

R ₁ [Ω]	1,00
R ₂ [Ω]	10,00
C ₁ [F]	0,20

C ₂ [F]	I ₀ [A]	R _p [Ω]	<P> _{R2} [W]	X _p [Ω]	X [Ω]
0,02	2,23	9,62	23,94	1,92	3,08
0,04	2,88	8,62	35,83	3,45	1,55
0,06	3,39	7,35	42,26	4,41	0,59
0,08	3,75	6,10	42,87	4,88	0,12
0,10	4,08	5,00	41,67	5,00	0,00
0,12	4,43	4,10	40,14	4,92	0,08
0,14	4,74	3,38	37,95	4,73	0,27
0,16	4,96	2,81	34,55	4,49	0,51
0,18	5,05	2,36	30,02	4,25	0,75
0,20	5,00	2,00	25,00	4,00	1,00
0,22	4,86	1,71	20,23	3,77	1,23
0,24	4,67	1,48	16,15	3,55	1,45
0,26	4,47	1,29	12,86	3,35	1,65
0,28	4,27	1,13	10,30	3,17	1,83
0,30	4,08	1,00	8,33	3,00	2,00
0,32	3,91	0,89	6,82	2,85	2,15
0,34	3,77	0,80	5,64	2,71	2,29
0,36	3,63	0,72	4,73	2,58	2,42
0,38	3,52	0,65	4,00	2,46	2,54
0,40	3,41	0,59	3,42	2,35	2,65

