



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

Masteroppgave

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer - Maskinkonstruksjoner	Vårsemesteret, 2018
Student: Endre Fossesholm signatur (er)
Faglig ansvarlig: Hirpa G.Lemu Ekstern Veileder: Ola Ravndal	
Tittel på oppgaven: Design og evaluering av en bølgeenergi konverterings mekanisme (enhet) Engelsk tittel: Design and Evaluation of Wave Energy Converter Mechanism (Device)	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Bølgekraft, Støthevert, Trykkstøt, Analyse, Design	Sidetall: 47 + vedlegg/annet: 1 Stavanger, 15.06.2016

Sammendrag

Det er et stort fokus på global oppvarming og fornybare energi i dagens samfunn. En stor fornybar energikilde som ennå ikke har blitt tatt i bruk er bølgeenergi. Det finnes mye energi i bølger, men det eksisterer ingen store kommersielle bølgekraftverk i dag. Det finnes et stort rom for innovasjon av løsninger som kan konvertere bølgeenergi til elektrisk energi.

En slik løsning er foreslått av Karl Venås, og dette forslaget er bakgrunnen for denne masteroppgaven. Det foreslåtte bølgekraftverket benytter virkemåten til en støtthevert, og omdanner en støtthevert til et bølgekraftverk. Dette er gjort ved at vann i et innløpsrør er akselerert ved hjelp av bølgenes hastighet istedenfor at vannet akselereres ved hjelp av tyngdekraften fra et reservoar. Vannet løftes til et reservoar og en vannturbin omdanner den potensielle energien i vann til elektrisitet.

Kraftproduksjonen til det foreslåtte bølgekraftverket er analysert for å finne variablene som er viktig for kraftproduksjonen. Størrelsen et kraftverk må ha for å kunne produsere en nyttig mengde med kraft er undersøkt.

De viktigste variablene for et slikt bølgekraftverk er innløpslengden L_1 , reservoarhøyden z_3 , utløp og innløps diameter D_2 og D_1 , bølgenes hastighet v og bølgenes periode t_2 . Kraftproduksjonen er i stor grad begrenset av et sett med grenseverdier, disse grenseverdiene er også funksjoner av disse variablene. Ettersom bølgehastigheten v og bølgeperioden t_2 er variable må også grenseverdiene være variable for å sørge for at bølgekraftverket er så effektivt som mulig. Grenseverdiene kan forandres ved å ha en variabel reservoarhøyde z_3 .

Det er tre store utfordringer som tradisjonelt kobles til bølgekraftverk, og det foreslåtte bølgekraftverket løser disse utfordringene godt. De tradisjonelle utfordringene er at et bølgekraftverk må motstå store bølger uten å bli ødelagt. Et bølgekraftverk må kunne mellomlagre energi for å få en kontinuerlig kraftproduksjon. Et bølgekraftverk må kunne fungere når bølgenes amplitude, bølgelengde og periode forandrer seg relativt tilfeldig.

Det foreslåtte bølgekraftverket har utfordringer knyttet til en konstruksjon av enheten på en økonomisk måte. Ved en god plassering av enheten i naturen kan kostnadene reduseres, og å finne en slik lokasjon er dermed viktig. Dette konseptet for et bølgekraftverk er lovende og det kan være interessant og fruktbart å se videre på konseptet.

Forord

Jeg vil takke mine veiledere Hirpa G. Lemu og Ola Ravndal for mange innsiktsfulle og verdifulle kommentarer.

Jeg vil også takke Karl Venås for å ha vært tilgjengelig hvis jeg hadde noen spørsmål om konseptet.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	II
Forord	III
Figur liste	VI
Tabell liste.....	VIII
1. Introduksjon	- 1 -
1.1 Problemstilling.....	- 2 -
2. Lineær bølgeteori	- 4 -
3. Litteraturstudie.....	- 7 -
3.1 Eksisterende bølgekraftverk.....	- 7 -
3.1.1 Pelamis	- 8 -
3.1.2 Wave Dragon	- 8 -
3.1.3 WaveEL	- 9 -
3.1.4 LIMPET	- 10 -
3.1.5 Archimedes Wave Swing	- 10 -
3.1.6 The Penguin	- 11 -
3.1.7 Waveroller	- 11 -
3.1.8 Oppsummering av eksisterende konsepter og prototyper	- 12 -
3.2 Støthevert.....	- 12 -
3.3 Trykkstøt.....	- 14 -
4. Analyse av kraftproduksjon	- 15 -
4.1 Volum pumpet fra innløpsrør til reservoar	- 18 -
4.2 Kraft produsert	- 20 -
5. Utregninger	- 22 -
5.1 Kraftproduksjon.....	- 22 -
5.2 Hydraulisk akkumulator størrrelse	- 27 -
5.3 Lukketid for lukkesystem.....	- 28 -
6. Spenningsberegning	- 29 -
7. Design	- 33 -
7.1 Plassering.....	- 33 -
7.2 Sensorer.....	- 34 -
7.3 Tilbakeslagsventil	- 34 -
7.4 Hydraulisk akkumulator	- 35 -
7.5 Innløpsrør	- 35 -

7.6 Lukkemekanismer.....	- 36 -
7.6.1 Hydraulikksystem og spjeld	- 36 -
7.6.2 Andre muligheter.	- 37 -
7.7 Reservoar.....	- 39 -
7.8 Korrosjon	- 39 -
7.9 Materialer.....	- 42 -
8. Diskusjon	- 44 -
9. Konklusjon	- 47 -
10. Referanser	I
Vedlegg.....	V
Vedlegg A: Patentsøknad utgangspunkt.	V
Vedlegg B.....	IX

Figur liste

Figur 1: Forenklet prinsippskisse av foreslått bølgekraftverk. De blå boksene illustrerer vannets bevegelse.....	- 1 -
Figur 2: Konsept illustrert med flottør og vektarm slik sett fra patentsøknaden.	- 2 -
Figur 3: En enkel bølge med de viktigste bølgeparameterne.....	- 4 -
Figur 4: Illustrasjon av den horisontale partikkelbevegelsen i bølger ved grunne og dype bølger. ...	- 5 -
Figur 5: Bølgespekteret med Jonswap og Pierson-Moskowitz ved dimensjonsløse akser.	- 6 -
Figur 6: Pelamis utenfor EMEC test senter i Skottland [8].	- 8 -
Figur 7: Wave Dragon illustrert med turbiner, reservoar, rampe og vinger [10].....	- 9 -
Figur 8: WaveEL før den er installert, den røde delen går under overflaten og den gule delen flyter [13].	- 9 -
Figur 9: LIMPET prinsipp med et betong kammer, og en Wells turbin [15].	- 10 -
Figur 10: AWS konsept, den røde delen beveger seg, mens den blå delen sitter fast på havbunnen [16].	- 11 -
Figur 11: The Penguin wave energy konsept, den røde delen er et svinghjul, og den gule delen er en generator [18].	- 11 -
Figur 12: Waveroller illustrasjon, med en båt og et menneske på havbunn for størrelsessammenlikning [20].	- 12 -
Figur 13: Støthevert prinsippskisse, rør F går til et høyere liggende reservoar [22].....	- 13 -
Figur 14: Variasjon i hastighet i utløpsrøret mot aktiv pumpetid.	- 14 -
Figur 15: Systemet med utløpet til reservoar (3), innløpsrør (1) og hydraulisk akkumulator (2).	- 17 -
Figur 16: Graf over innløpsdiameter $D1$ (m) mot kraftproduksjon $P(W)$	- 23 -
Figur 17: Graf over utløpsdiameter $D2$ (m) mot kraftproduksjon $P(W)$	- 24 -
Figur 18: Graf over reservoarhøyde $z3$ (m) mot kraftproduksjon $P(W)$	- 24 -
Figur 19: Graf over innløpslengde $L1$ (m) mot kraftproduksjon $P(W)$	- 25 -
Figur 20: Graf over innløpshastighet v (m/s) mot kraftproduksjon $P(W)$	- 25 -
Figur 21: Pumpesyklusen ts gitt mot innløpslengden $L1$, reservoarhøyden $z3$, innløpshastigheten v og den konstante bølgeperioden $t2$	- 26 -
Figur 22: Lukketid tc mot innløpslengde $L1$	- 28 -
Figur 23: Sylinder som representerer innløpsrøret med et indre trykk P_i , a er indre radius og b er ytre radius.	- 29 -
Figur 24: Tangentiellspenning $\sigma_{\theta\theta}$ mot den ytre radiusen b . $b = a$ ved 500, og grafen representerer derfor spenning mot tykkelse.	- 31 -
Figur 25: Tangentiell spenning $\sigma_{\theta\theta}$ mot den indre radiusen a	- 32 -
Figur 26: Plassering av enheten i naturen, (a) med et rør som starter ved kysten, (b) med et rør som starter lengre ut i havet, og (c) enhet ved en molo.	- 33 -
Figur 27: Optisk strømmingsmåler illustrert ved en gas strømning.	- 34 -
Figur 28: Illustrasjon av en svinge tilbakeslagsventil.....	- 35 -
Figur 29: Forskjellige typer trykktanker for vann [30].	- 35 -
Figur 30: Designforslag for innløpsrøret, den svarte og blå delen er forsterkeren med en grill, trykkstøtet oppstår i det gule røret.	- 36 -
Figur 31: Hydraulikk prinsipp illustrert.	- 37 -
Figur 32: Impulse valve slik benyttet i en tradisjonell støthevert [24].	- 38 -
Figur 33: F_m er kraft fra motstand og F_v er friksjonskraften fra vann.	- 38 -
Figur 34: Lineær motor komponenter, det svarte på bunn av komponentene vil være statoren og den grå delen med N og S symboler er rotatoren som beveger seg.	- 39 -

Figur 35: Pourbiax diagram, det røde området er korrosjonsområdet, det grønne området er passivitets område og det gule området er immunitetsområdet [35]. - 40 -

Figur 36: Utmattings korrosjon, den øverste grafen er utmatting uten korrosjon, og den nederste grafen er med korrosjon [36]. - 41 -

Figur 37: Innløpshastighet v som funksjon av dybde d - 46 -

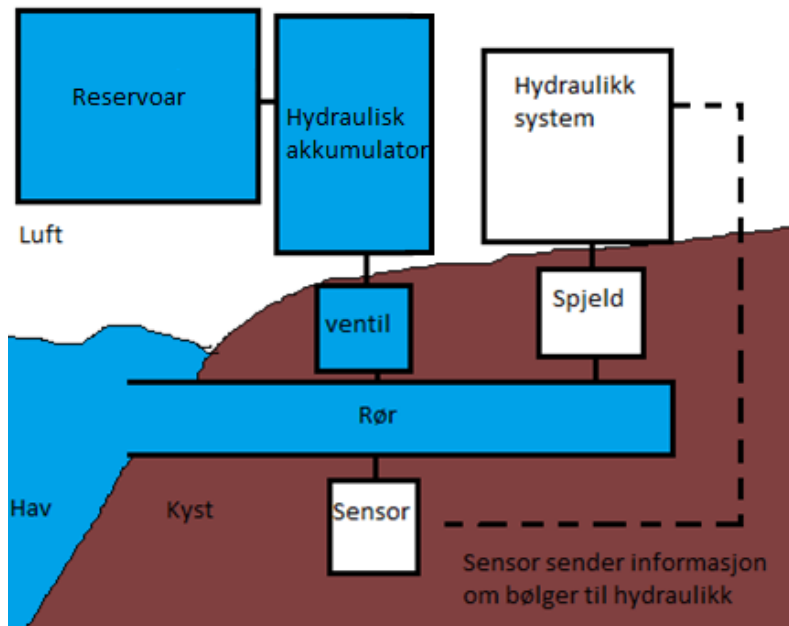
Tabell liste

Tabell 1: Et utvalg av formler gitt av lineær bølgeteori.....	- 4 -
Tabell 2: Variabler og konstanter benyttet til utregning av kraftproduksjon og grenseverdier.....	- 22 -
Tabell 3: Innløpsdiameter D_1 mot kraft produsert ved små diametere	- 44 -

1. Introduksjon

Utgangspunktet for denne masteroppgaven er et bølgekraftverk basert på en støthevert slik beskrevet i patentsøknaden til Karl Venås. Patentsøknaden det er tatt utgangspunkt i er lagt ved som vedlegg A. Figur 1 viser en forenklet prinsippskisse av systemet. Systemet fungerer ved at bølgene akselererer vann i et rør før vannet blir stoppet plutselig av et spjeld. Denne plutselige reduksjonen i hastighet fører til at det oppstår et stort trykk i røret. Trykket driver vannet i røret opp igjennom en tilbakeslagsventil, en hydraulisk akkumulator og opp i et reservoar. Bevegelsen til vannet illustreres ved hjelp av de blå boksene i figur 1.

Det er antatt at systemet ligger på land slik illustrert ved den brune fargen i figuren. Røret er åpent mot havet og ligger alltid under vann. Spjeldet lukkes ved hjelp av et hydraulikksystem som styres via en sensor som måler strømningshastigheten i røret.



Figur 1: Forenklet prinsippskisse av foreslått bølgekraftverk. De blå boksene illustrerer vannets bevegelse.

Det finnes tre store utfordringer for bølgekraftverk som må løses:

1. Et bølgekraftverk må fungere ved varierende bølgeamplituder, perioder og bølgelengder.
2. Et bølgekraftverk må overleve ekstrem bølger og stormer.
3. Et bølgekraftverk må ha en metode for å mellomlagre energi slik at bølgene som er periodiske produserer en konstant kraft.

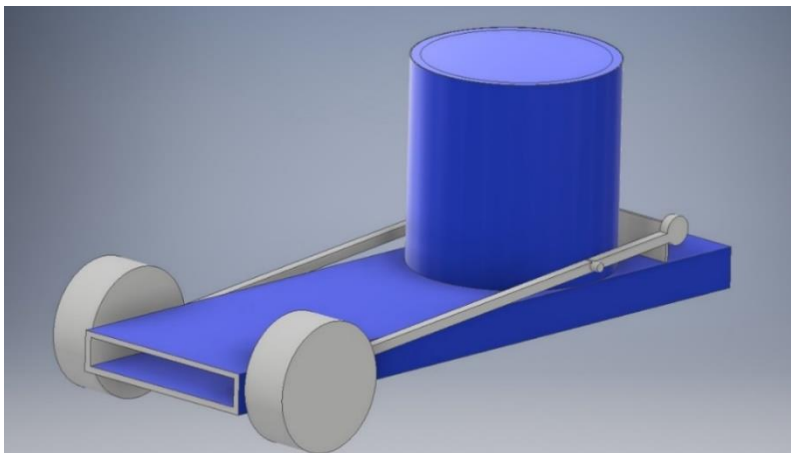
I tillegg til disse tre punktene er «power takeoff system» eller PTO til et bølgekraftverk veldig viktig. Et PTO kan defineres som mekanismen bølgekraftverket benytter for å absorbere bølgeenergi og omforme denne til anvendbar elektrisk energi [1]. PTO for dette systemet vil bestå av røret, tilbakeslagsventilen, den hydrauliske akkumulatoren, reservoaret og turbinen. Utformingen av et PTO er sentralt for å løse de tre utfordringene presentert ovenfor.

Det foreslåtte bølgekraftverket må håndtere en variabel bølgeperiode og en variabel hastighet. Hastigheten på bølgene er en funksjon av alle de grunnleggende bølgevariablene. Ved hjelp av sensoren kan tidspunktet spjeldets nedslag skjer på varieres slik at det alltid treffer når bølgene har nådd sin maksimale hastighet. Dette nedslaget er en utfordring å få til på et optimalt tidspunkt.

Stormbeskyttelse av det foreslåtte bølgekraftverket vil variere i henhold til hvilken komponent som skal beskyttes. Røret kan beskyttes mot stormer ved å stenge den når bølgene blir for energirike. Den hydrauliske akkumulatoren og hydraulikksystemet kan beskyttes ved å bygge dette under bakken eller ved å bygge de inn i en beskyttende struktur.

Systemet kan lagre energi på mange forskjellige måter, men den enkleste muligheten er å benytte et reservoar. Strømningsmengden til turbinen fra reservoaret må være relativt konstant, og reservoaret må aldri tømmes. Volumet av vann som blir pumpet opp til reservoaret må være tilstrekkelig til å mate turbinen med vann slik at den alltid er aktiv. På denne måten vil turbinen få en konstant kraftproduksjon. En annen mulighet er å lagre energien som trykkenergi i luft i den hydrauliske akkumulatoren. Utfordringen med denne løsningen er at en akkumulator må være stor for å lagre tilstrekkelige mengder med energi og vann.

For å produsere et trykkstøt er det nødvendig å stoppe strømmingen av vann hurtig. Dette gjøres ved hjelp av en lukkemekanisme, og det finnes mange forskjellige typer lukkemekanismer som kan benyttes. Figur 2 illustrerer det foreslåtte bølgekraftverket med et flottørvektarm system som en lukkemekanisme slik det er beskrevet i patentsøknaden. I figuren er denne lukkemekanismen illustrert ved den grå fargen, og flottøren er de to grå sylindrene til venstre i figuren. Dette systemet fungerer ved at flottøren vil bli dyttet oppover av bølgene. Når flottøren blir dyttet oppover blir spjeldet dyttet nedover av vektarmen som kobler spjeldet og flottøren sammen. Videre i oppgaven er hydraulikksensorsystemet benyttet og flottørvektarmsystemet er ikke behandlet. Dette ettersom flottørsystemet vil ha vanskeligheter med å tilpasse seg optimal drift ved forskjellige bølgetilstander. Det er også en mistanke om at dette systemet ikke er robust nok til å motstå de store kreftene fra bølgene.



Figur 2: Konsept illustrert med flottør og vektarm slik sett fra patentsøknaden.

1.1 Problemstilling

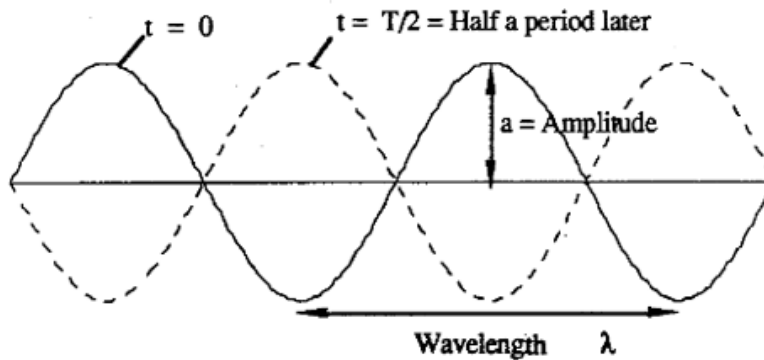
Det sentrale i patentsøknaden er PTO mekanismen som får vannet opp i reservoaret. Denne mekanismen er basert på en støthevert og trykkstøt fenomenet. Ved å bruke teori fra disse områdene gjøres det en matematisk beskrivelse av mekanismen og variablene som styrer kraftproduksjonen til dette systemet.

Bølgekraftverket er beskrevet på et prinsipielt nivå, men det er fortsatt mange muligheter for hvordan enheten kan konstrueres. Det finnes mange forskjellige måter prinsippene kan gjennomføres på, og en utarbeiding og evaluering av måtene prinsippene kan bli løst på gjøres. Problemer som for eksempel korrosjon kan unngås eller reduseres ved bruk av riktige materialer og god utforming på systemet.

Målet med oppgaven er å kunne beskrive prinsippene for et godt bølgekraftverk med viktige operasjonelle parameterne samt vurderinger av komponenter og miljøfaktorer som påvirker driften.

2. Lineær bølgeteori

En vanlig bølge kan defineres som en sinus eller cosinus funksjon. For å beskrive en vanlig bølge trengs bølgeamplituden a , perioden T og bølgelengden λ . En enkel bølge er illustrert i figur 3. Bølgelengden λ beskriver lengden mellom bølgetoppene, perioden T beskriver tiden det tar for bølgen å forflytte seg en bølgelengde. Amplituden a er høyden fra middels nivå til bølgetoppen.



Figur 3: En enkel bølge med de viktigste bølgeparametere.

En enkel bølgefunksjon kan skrives som en funksjon n av både tid t og posisjon x gitt ved likning 2.1.

$$n(x, t) = a \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right) \quad 2.1$$

Ved å sette $2\pi/T = \omega$, som kalles vinkelfrekvens og $2\pi/\lambda = k$, som kalles bølgenummeret kan bølgefunksjonen skrives på en enklere måte gitt ved likning 2.2.

$$n(x, t) = a \sin(\omega t - kx) \quad 2.2$$

Den lineære bølgeteorien deler bølger opp i tre klassifikasjoner avhengig av hvor de finnes. Disse klassifikasjoner er grunne bølger, mellomliggende bølger og dype bølger. Hver av disse klassifikasjoner har et sett med likninger assosiert med seg. Klassifikasjonen finnes ved å se på forholdet mellom bølgelengde og amplitude slik gitt i tabell 1. Grunne bølger finnes nære kysten, og dype bølger er bølger som finnes ute på havet ved større dyp.

I denne oppgaven er bølgehastigheten den viktigste bølgeparameteren av interesse. Hastigheten til bølger u er beskrevet i tabell 1. Det finnes en sammenheng mellom bølgelengden λ og perioden T kjent som «dispersion relation». Denne sammenhengen er gitt i tabell 1, g er tyngdekraftens akselerasjon og d er dybden på havet.

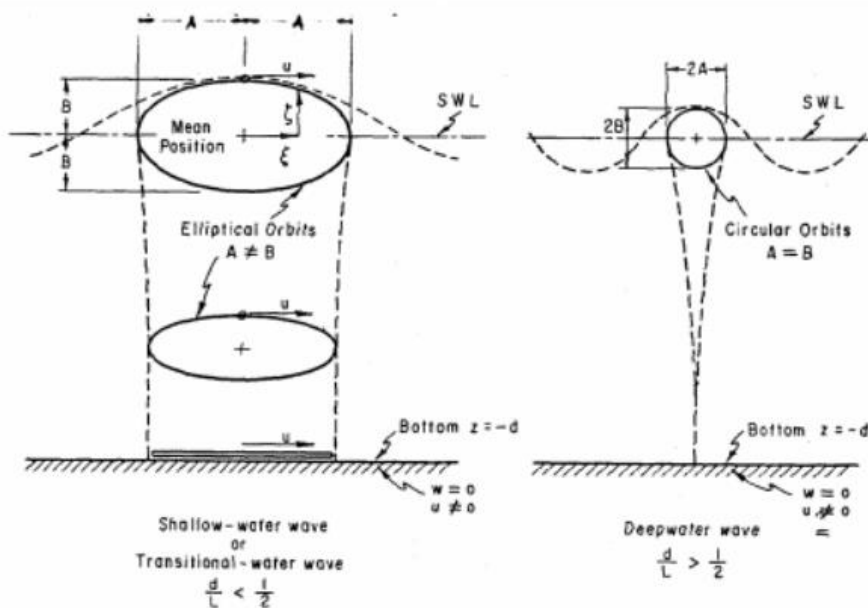
Tabell 1: Et utvalg av formler gitt av lineær bølgeteori.

Klassifikasjon	Grunne bølger	Mellomliggende bølger	Dype Bølger
Gyldighet område	$\frac{a}{\lambda} < \frac{1}{20}$	$\frac{1}{20} < \frac{a}{\lambda} < \frac{1}{2}$	$\frac{a}{\lambda} > \frac{1}{2}$
«Dispersion relation»	$\omega^2 = gk^2d$	$\omega^2 = gk \tanh(kd)$	$\omega^2 = gk$

Horisontal hastighet u	$\frac{\omega a}{kd} \sin(\omega t - kx)$	$\omega a \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh(kd)} \sin(\omega t - kx)$	$\omega a e^{kz} \sin(\omega t - kx)$
Maksimum horisontal hastighet u	$u = \frac{\omega a}{kd}$	$u = \omega a \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh(kd)}$	$u = \omega a e^{kz}$

Tabell 1 viser at den horisontale hastigheten u er en syklisk hastighet som forandrer seg ved posisjon x og tid t . Systemet vil lukke spjeldet når hastigheten er størst mulig for å få en størst mulig kraftproduksjon. Maksimumshastigheten for den horisontale partikkelbevegelsen finnes når $\sin(\omega t - kx) = 1$.

Partiklene i havet forskyver seg i utgangspunktet veldig lite, men de går i en sirkelbane ved overflaten slik vist i figur 4. Disse sirkelbevegelsene er sterke ved overflaten, og blir etter hvert borte ettersom dybden økes slik illustrert i figur 4 ved de stiplede linjene som går nedover. Ved grunne bølger vil bevegelsen bli mer elliptisk og partiklene beveger seg mer i den horisontale retningen. Det er denne bevegelsen det foreslåtte kraftverket benytter, og det er også denne hastigheten u som er oppgitt i tabell 1 [2].



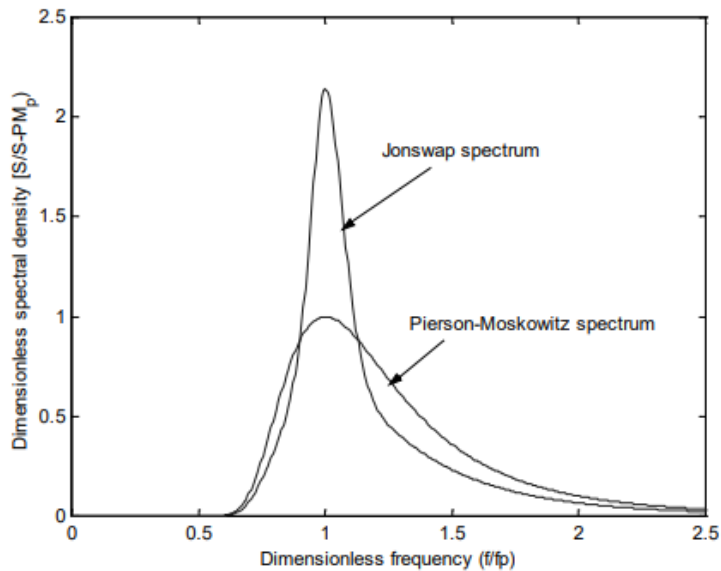
Figur 4: Illustrasjon av den horisontale partikkelbevegelsen i bølger ved grunne og dype bølger.

Det virkelige havet kan ikke beskrives av en enkel sinus funksjon, men vil være en samling av en stor serie bølger med forskjellige perioder, amplituder og bølgelengder som overlapper. Denne overlappingen av en stor serie med bølger er det som skaper den komplekse og tilfeldige sjøen som observeres. Sannsynlighetsmodeller må benyttes for å kunne diskutere disse komplekse og tilfeldige bølgene. Enheten må fungere over et spektrum av bølgevariablene for å kunne produsere kraft effektivt [3].

Et bølgespektrum er en sannsynlighetsmodell som beskriver hvordan frekvensen til bølgene er koblet sammen med bølgeamplituden. To slike spektre er illustrert i figur 5 ved Jonswap spektrumet og

Pierson-Moskowitz spektrumet. Disse spektrene har en litt forskjellig matematisk beskrivelse, men et fellestrekk er at de beskrives ved hjelp av de samme variable bølgedataene.

Bølgedata er typisk målt ved hjelp av variablene T_p , H_s og bølgeretning. T_p er bølgeperioden som samsvarer med den høyeste spektral tettheten, i figur 5 vil frekvensen som gir T_p være nær 1. Den betydelige bølgehøyden H_s beskriver amplituden på bølgen og er det viktigste målet for bølger. For å regne ut hvor mye kraft det foreslåtte bølgekraftverket kan produsere benyttes verdiene for H_s og T_p som a og t ettersom dette er normen [3].



Figur 5: Bølgespekteret med Jonswap og Pierson-Moskowitz ved dimensjonsløse akser.

3. Litteraturstudie

I dagens samfunn er det et stort fokus på global oppvarming og fornybar energi. Bølgekraft er en stor fornybar energikilde som ennå ikke er blitt tatt i bruk i stor skala. Det estimeres at det er 290 GW bølgekraft tilgjengelig i Nord-Atlanteren [4].

Bølgeenergi er som de fleste andre energikilder en annen form for solenergi. Solen varmer opp forskjellige områder på jorden til forskjellige temperaturer. Disse forskjellene danner vind som blåser over havet, deler av denne vindenergien blir overført til havet som danner bølger. Bølger kan reise flere tusen kilometer uten å miste mye energi [5]. De beste områdene for bølgekraft i verden er ved 40° til 60° på den sørlige halvkulen hvor sesongenes variabilitet er liten.

Bølgekraft har flere fordeler i forhold til solkraft eller vindkraft. Noen bølgekraftverk kan produsere kraft opptil 90 % av tiden i forhold til vindkraft og solkraft som er aktive 20 – 30 % av tiden. I tillegg til dette er det lettere å forutsi bølgeressurser enn vindressurser [6]. Energitettheten er mye høyere for bølger enn andre fornybare energikilder slik som vind eller sol. Dette fører til at arealet som blir benyttet til bølgekraftverk i teorien kan være mye mindre enn solcelleparker eller vindparker for samme mengde kraft produsert. Bølgekraft er derimot mye mindre utviklet enn solkraft og vindkraft. Dette er mye på grunn av liten politisk vilje til å satse på bølgekraft [5].

I tillegg til en liten politisk vilje til å satse på bølgekraft er det mange utfordringer som må løses. Bølger er uregelmessige i henhold til amplitude, bølgelengde og periode. Det er vanskelig å produsere kraft over hele bølgespekteret da bølgekraftverk ofte er designet for en seksjon av bølgespekteret. I tillegg til dette kan ekstremvær produsere bølger som kan gi laster på strukturen som er opptil 100 ganger større enn det enheten er designet for å tåle under vanlig operasjon. Dette er spesielt viktig da overdimensjonering gjør at bølgekraft har vanskeligheter med å bli økonomisk konkurransedyktig. Den siste store teknologiske utfordringen er at bølgekraft krever en form for mellomlagring av energi for å redusere de pulserende bølgene til en kontinuerlig effekt. Dette ettersom bølgene er periodiske, og det eksisterer perioder der det ikke er noen kraftproduksjon og perioder der kraftproduksjonen er veldig høy. Det er dermed nødvendig med en form for mellomlagring av energi som sørger for en konstant kraftproduksjon [4].

Ved å benytte et bølgekraftverk offshore er det i tillegg til disse utfordringene også andre utfordringer som må løses. Bølgeretningen forandrer seg ofte offshore og en enhet må dermed orientere seg i denne retningen. Nær kysten vil ikke dette være et problem da bølgene kommer i omtrent samme retning. Enhetene offshore må greie å motstå større krefter ute på det åpne havet enn kystbaserte enheter [6].

3.1 Eksisterende bølgekraftverk

Det eksisterer et stort antall konsepter og små prototyper for bølgeenergi konverterings mekanismer, også kalt WEC. Det eksisterer få WEC på en full skala som er koblet til det elektriske nettet. Fokuset i denne litteraturstudien er på større WEC som er nærmere kommersialisering.

Det eksisterer ingen standardiserte systemer for å definere forskjellige typer WEC, og det eksisterer mange måter å definere disse på. Kategoriene som blir benyttet av European Marine Energy Centre (EMEC) er benyttet her, men de vil bare bli diskutert hvis det eksisterer en fullskala prototype innenfor kategorien. De baserer definisjonen på hvordan mekanismen fungerer. Kategoriene er som følger: «Attenuator», «Point Absorber», «Oscillating Wave Surge Converter», «Oscillating Water Column», «Overtopping/Terminator device», «Submerged Pressure Differential», «Bulge wave» og «Rotating mass» [7].

3.1.1 Pelamis

Pelamis er en WEC som ligger under kategorien «Attenuator». Den er en halvveis neddykket struktur som består av flere sylindere som henger sammen ved hjelp av hengslede ledd. Figur 6 viser en Pelamis demonstrator enhet. Leddene som kobler sylindrene til hverandre vil enten bli trykket fra hverandre eller trykket sammen på grunn av bølgens bevegelse. Det er denne bevegelsen som driver en hydraulisk motor som igjen driver en elektrisk generator som produserer elektrisitet. Elektrisiteten blir overført fra Pelamis til land via en kabel på sjøbunnen.

Pelamis er fortøyd på en slik måte at enheten fungerer som en værhone og stiller seg imot retningen bølgene kommer i. Ved hjelp av denne mekanismen stiller Pelamis seg automatisk inn i retningen som er optimal for kraftproduksjon. Når bølgeamplituden blir for høy eller bølgene for bratte vil Pelamis bli senket litt under havoverflaten slik at strukturen bare kommer frem ved bølgetopper. Dette hindrer store krefter i å gjøre skade på strukturen ved hjelp av store bøyemomenter i stormer.

Pelamis sin bevegelse kan deles inn i en vertikal retning, og i en horisontal retning. Ved å forandre hvor store tøyler hver av aksene har kan bevegelsen til Pelamis kontrolleres og kan komme nærmere eller lengre unna resonans. Ved resonans vil Pelamis produsere mer kraft, men er da utsatt for større krefter [5].



Figur 6: Pelamis utenfor EMEC test senter i Skottland [8].

3.1.2 Wave Dragon

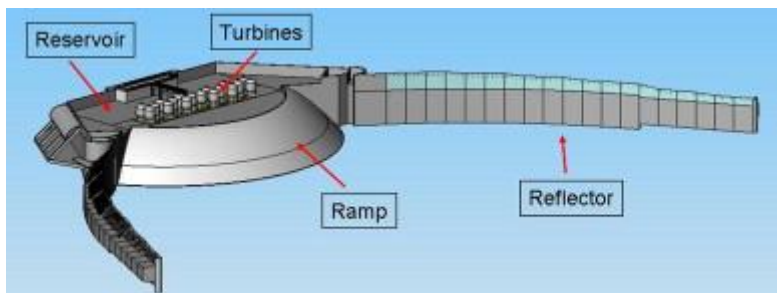
Wave Dragon er en WEC som ligger under kategorien «overtopping». I en overtopping WEC blir bølger skylt opp en rampe for deretter å lande i et reservoar som er hevet over sjøen. Wave Dragon er illustrert i figur 7 med de viktigste komponentene. På grunn av forskjellen i høyde mellom reservoaret og havet har vannet i reservoaret en høyere potensiell energi som kan bli benyttet til å produsere elektrisitet. Det finnes turbiner på bunn av reservoaret som vannet renner igjennom på veien tilbake til havet. For å få en økt kraftproduksjon blir vinger satt på kanten av rampen som øker amplituden til bølgene som når rampen, og dermed også energien.

Wave Dragon er store enheter som er designet for å produsere kraft på 4 – 11 MW per enhet. Størrelsen på enheten gir en del fordeler. Det er enklere og billigere å utføre vedlikehold da det er mulig å jobbe ombord i enheten. På grunn av størrelsen gir den heller ikke store utslag på grunn av bølger, som igjen reduserer utmattingsproblemer. Ved større bølger er det heller ingen problemer med dette designet ettersom bølger vil vaske over plattformen uten å gjøre noe skade. Systemet som en helhet har overlevd en 100 års storm der den eneste skaden var et svakt ledd i fortøyningsystemet som førte til at prototypen ble vasket opp på en strand med mindre skader [5].

Den eksisterende prototypen eller demonstrator enheten er på 4 MW. Avstanden mellom tuppene på vingene er 230 m, lengden er 150 m og reservoaret ligger mellom 3 m og 6 m over overflaten på

havet. Ved å benytte en grill på 50 mm rundt turbinene er marine rester hindret i å skade turbinene [9].

Kontrollsystemet til Wave Dragon er delt inn i to deler. Den første måten Wave Dragon kan kontrollere kraftproduksjonen på er å justere høyden på rampen og reservoaret. Den andre måten systemet kan kontrollere kraftproduksjonen er ved å justere antall turbiner som er aktive, og dermed mengde med vann i reservoaret. Høyden på rampen og reservoaret blir justert ved å pumpe inn luft under reservoaret. Ved å justere høyden på reservoaret kan mengden med energi som er tilgjengelig i reservoaret økes på bekostning av hvor mye vann som kommer opp fra rampen. Ved et fullt reservoar vil mengden kraft produsert av turbinene være høyere enn ved et lavere vannspeil. Det er ideelt å ha en så høy vannstand som mulig, men å likevel unngå at vann renner over kanten på reservoaret [5].



Figur 7: Wave Dragon illustrert med turbiner, reservoar, rampe og vinger [10].

3.1.3 WaveEL

WaveEL er en WEC som ligger under kategorien «point absorber», denne type WEC er små bøyer som flyter på havet. Figur 8 viser WaveEL bøyen før den er installert. WaveEL består av et langt hult vertikalt rør, og inne i dette røret er det et vannstempel som er koblet til et hydraulisk konversjonssystem. Når systemet installeres vil røret bli stående rett ned i vannet og være fylt av vann. Systemet kan beskrives som to forskjellige masser, den ene er bøyen med røret og den andre er vannsøylen inne i røret. Disse to massene vil ha en ulik naturlig frekvens og vil svinge ved forskjellige faser.

Når vannstempelet beveger seg vil det dra med seg en del vann, men ettersom denne bevegelsen er ute av fase med bøylene vil den hydrauliske sylindren som er koblet til vannstempelet oppføre seg som en enorm hydraulisk pumpe. Denne pumpen er deretter koblet til en akkumulator som igjen er koblet til en hydraulisk motor som driver en generator [11].

Ettersom dette er en liten bøye vil systemet ikke motstå bølgene men heller følge de. Bøyen har en elastisk forlenging for å forhindre skader i bølgehøyder opp til 24 m. Bøyer med lignende dimensjoner fra US Coastal Guard har overlevd på havet i over 100 år. På bakgrunn av dette er det en god grunn til å tro at dette systemet kan overleve ekstremvær og store bølger [12].

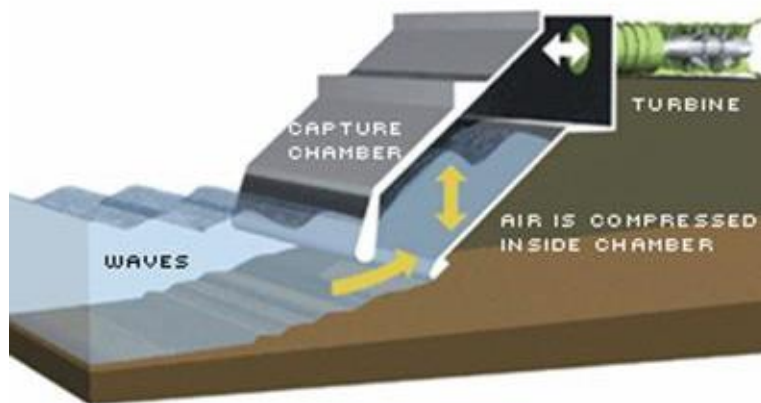


Figur 8: WaveEL før den er installert, den røde delen går under overflaten og den gule delen flyter [13].

Den 21 September 2017 ble en prototype åpnet ved Runde i Møre og Romsdal. Enheten har overlevd bølger opp til og med 14 meters høyde [14]. Dette kraftverket er på 100 kW og er Norges første bølgekraftverk som leverer strøm til kraftnettet. Den er omtrent 35 m lang og har en diameter på 8 m [11].

3.1.4 LIMPET

LIMPET står for «Land Installed Marine Power Energy Transmitter» og er klassifisert som et «OWC» eller «Oscillating Water Column» bølgekraftverk. LIMPET består av et tett kammer fylt med luft. Kammeret er åpent mot havet under vannlinjen slik illustrert i figur 9. Dette gjør at bølgene kan senke og heve vannlinjen inne i kammeret. Når dette skjer vil lufttrykket inne i kammeret bli forandret. Ved en heving av vannlinjen øker lufttrykket i kammeret og luften unnslipper via en turbin. Når vannlinjen senkes og trykket blir lavere inne i kammeret går luft fra atmosfæren inn i kammeret via turbinen. Ved å bruke en Wells turbin produseres det kraft både når luften går ut, men også når den kommer inn [5].



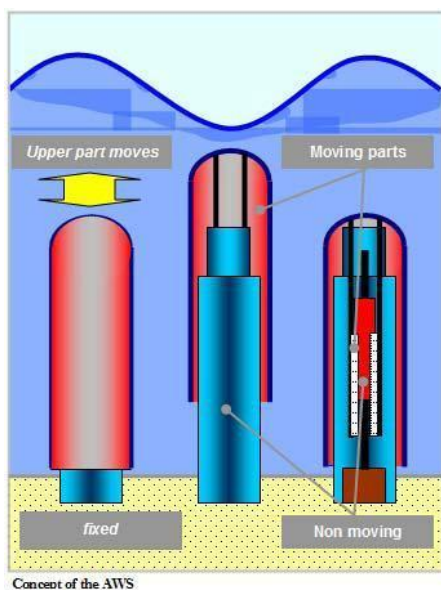
Figur 9: LIMPET prinsipp med et betong kammer, og en Wells turbin [15].

3.1.5 Archimedes Wave Swing

AWS eller “Archimedes Wave Swing” er en «Submerged Pressure Differential» WEC som ligger under vann. AWS består av en luftfylt silo med en åpning på toppen som er festet til havbunnen, denne siloen er illustrert i blått i figur 10. Det sitter en tett sylinder på toppen av denne siloen som hindrer vann i å komme inn. Denne sylinderen kan bevege seg opp og ned ettersom trykket forandrer seg på grunn av bølgene og er illustrert i rødt i figur 10. Ved hjelp av en lineær generator kan denne opp og ned bevegelsen bli konvertert til elektrisk energi.

Ettersom AWS er under vann er den godt beskyttet mot stormer og ekstrem vær. Det er også en fordel at den ikke syntes da det ikke vil oppstå konflikter mellom systemet og lokalbefolkning grunnet lyd eller visuelforsøpling.

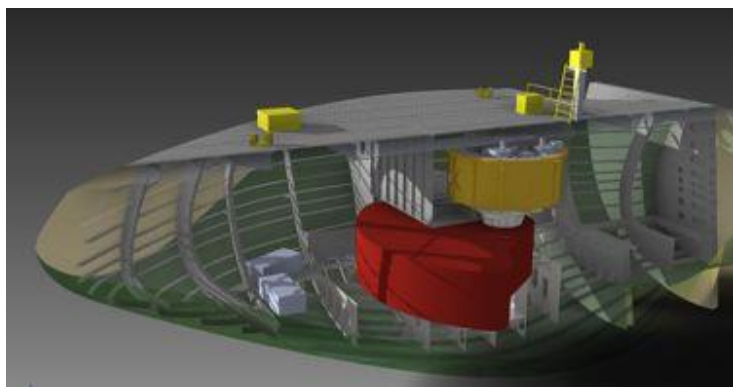
For å hindre at hastigheten til sylinderen når kritiske nivåer enten ved energirikebølger eller ved feil på generatoren er det satt inn et bremsesystem. Den naturlige frekvensen til systemet kan forandres ved å pumpe luft inn eller ut. Ved å forandre den naturlige frekvensen til systemet til den gjennomsnittlige bølgefrekvensen kan bevegelsen til sylindrene som går opp og ned forsterkes [5].



Figur 10: AWS konsept, den røde delen beveger seg, mens den blå delen sitter fast på havbunnen [16].

3.1.6 The Penguin

The Penguin er en WEC som ligger under kategorien «rotating mass». Enheten er flytende med et asymmetrisk skrog som beveger seg i forskjellige retninger ettersom bølgene passerer. Denne bevegelsen driver et svinghjul til å rotere som igjen driver en elektrisk generator slik illustrert i figur 11 der den røde delen er svinghjulet som er koblet til den gule generatoren. Enheten er 30 m lang, 9 m høy og har en vidde på 7 m, enheten er designet til å produsere 500 kW [17].



Figur 11: The Penguin wave energy konsept, den røde delen er et svinghjul, og den gule delen er en generator [18].

3.1.7 Waveroller

Waveroller er en WEC som ligger under kategorien «Oscillating wave surge». Enheten består av en tung platenestruktur som er neddykket og ankret til sjøbunnen i grunne farvann slik illustrert i figur 12. Den horisontale partikkelbevegelsen driver platen frem og tilbake. Bevegelsen driver en hydraulisk pumpe som pumper en hydraulisk væske til en hydraulisk motor som igjen driver en elektrisk generator. En enhet produserer kraft på mellom 500-1000 kW og er mer egnet nær kysten enn offshore ettersom den horisontale partikkel bevegelsen er sterkere ved kysten [19].



Figur 12: Waveroller illustrasjon, med en båt og et menneske på havbunn for størrelsessammenlikning [20].

3.1.8 Oppsummering av eksisterende konsepter og prototyper

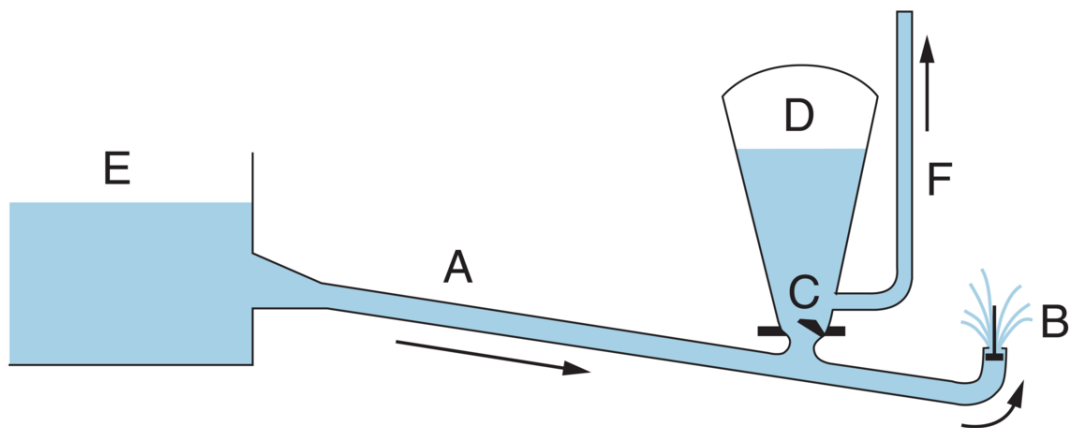
Enhetene i seksjon 3.1.1 – 3.1.7 illustrerer mange forskjellige konsepter for å produsere kraft ved hjelp av bølgenes energi. Disse enhetene har mange ulikheter, men også flere fellestrekk. Felles for alle enhetene er at ingen av disse konseptene har blitt benyttet i en kommersiell bølgekraftpark. Enhetene må sees i sammenheng med skipstrafikk, lokal befolkning og det maritime miljøet. Det er mange spørsmål som må svares på før et bølgekraftverk kan konstrueres. Hvor mye lyd lager enheten, hvordan påvirker enheten miljøet, hva er risikoen for å kolliderer med skip og hva skjer hvis enheten kolliderer med et skip [21].

Det er deler fra disse prosjektene og enhetene som kan videreføres til det foreslåtte bølgekraftverket. WaveDragon benytter en grill for å fange opp maritime rester foran vannturbinene. WaveDragon forandrer også reservoarhøyden, som kan være en mulighet for det foreslåtte bølgekraftverket. LIMPET viser at et system nær kysten kan beskyttes mot stormer ved en solid konstruksjon. Waveroller og Archimedes benytter den horisontale partikkelbevegelsen for å produsere kraft. Dette viser at et bølgekraftverk basert på dette fenomenet er mulig.

3.2 Støthevert

En støthevert er en selvvirkenes pumpe som benytter den kinetiske energien til vann i bevegelse. Konseptet er illustrert i figur 13. Vann fra et høyere liggende reservoar E setter vann i rør A i bevegelse, når dette vannet når en kritisk hastighet vil ventil B stenges. En del vann blir tapt ut ventil B før vannhastigheten i rør A når en kritisk verdi. Når ventil B stenges vil det oppstå et trykkstøt i røret, dette trykket åpner ventil C og vann fra rør A strømmes igjennom ventil C. Vannet kommer inn i en hydraulisk akkumulator D som inneholder en kombinasjon av vann og luft før vannet går ut igjennom et rør F til et reservoar som ligger høyere enn reservoar E [22].

Luften i den hydrauliske akkumulatoren D fungerer som en støtdemper for å dempe det intense støtet som blir produsert av trykkstøtet. Uten dette ville energien bli overført gjennom hele rørsystemet, noe som ville ført til at systemet ville blitt ødelagt [23].



Figur 13: Støthevert prinsippskisse, rør F går til et høyere liggende reservoar [22].

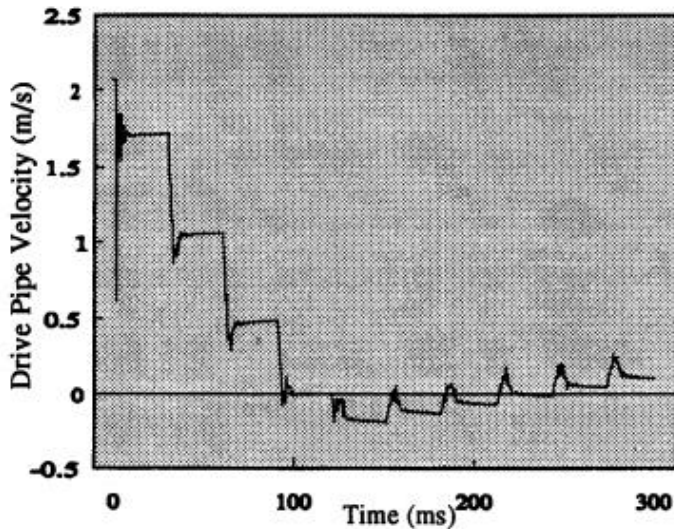
Virkemåten til en støthevert kan deles inn i en serie av perioder. Det er i litteraturen presentert flere måter å dele opp fasene til en støthevert. Her vil periodene bli delt opp i tre, akselerasjonsfasen, leveransefasen og rekylfasen.

I akselerasjonsfasen vil vann fra tank E bli akselerert igjennom rør A ved hjelp av tyngdekraften slik illustrert i figur 13. I denne fasen vil vannet i rør A gå ut igjennom ventil B. Denne akselerasjonsprosessen fortsetter til friksjonskreftene som blir produsert av bevegelsen til vannet er større enn kreftene som holder ventil B åpen. Fasen avsluttes når ventil B begynner å stenge. Forskjellen mellom det foreslåtte bølgekraftverket og en tradisjonell støthevert er at akselerasjonen av vann ikke vil skje på grunn av tyngdekraften, men på grunn av bølgenes bevegelse. Dette gjør at det er utfordrende å benytte etablerte likninger direkte, og bare deler av etablert teori om støtheverter er dermed anvendbar.

I leveransefasen vil den plutselige lukingen av ventil B gjøre at vannet i rør A stopper momentant. Dette resulterer i at det forekommer en trykkøkning i rør A. Mens dette høye trykket er opprettholdt vil tilbakeslagsventil C åpnes og vannet i rør A går inn i den hydrauliske akkumulatoren D og ut via rør F. Denne fasen vil være nærmest identisk for det foreslåtte bølgekraftverket, og det er her mye å hente fra etablert teori om støtheverter.

Etttersom vann blir pumpet opp fra røret vil trykket i røret reduseres, og rekylfasen vil starte når dette trykket når et punkt der tilbakeslagsventil C lukkes. Dette fører til en kortvarig revers strømming i rør A som fører til at ventil B åpnes og akselerasjonsfasen begynner igjen.

Trykket, og dermed også hastigheten vannet pumpes med i en støthevert vil variere. Denne variasjonen kan sees på som en trinnvis variasjon slik illustrert i figur 14. Hastigheten vil være konstant i en periode, før den blir redusert, for deretter å være konstant på et lavere nivå i en ny periode. Dette fortsetter til hastigheten er redusert til null. Hver periode har en varighet på $\frac{2L}{a}$. Reduksjonen i hastighet etter den første perioden er $\frac{gz_3}{a}$, og reduksjonen i hastighet etter den andre perioden og alle følgende perioder er $\frac{2gz_3}{a}$. Her er g tyngdekraftens akselerasjon, a er trykkbølgens hastighet, L er lengden på røret og z_3 er høyden til leveranseresservoaret [24].



Figur 14: Variasjon i hastighet i utløpsrøret mot aktiv pumpeid.

3.3 Trykkstøt

Trykkstøt fenomenet er drivkraften for en støthevert og en matematisk beskrivelse av fenomenet er nødvendig. Her er den enkleste likningen for et trykkstøt benyttet, også kalt Joukowsky likningen. Denne likningen antar at trykket oppstår momentant, og blir borte momentant.

Trykket produsert av trykkstøt er gitt ved formel 3.1, der v er hastigheten i røret, ρ er tettheten til fluiden og a er trykkbølgens hastighet.

$$\Delta p = \pm \rho a v \quad 3.1$$

Trykkbølgens hastighet a er gitt ved likning 3.2, her er K bulk modulus til fluiden, ρ er tettheten til fluiden, E er Youngs modulus for røret, D er den indre diameteren på røret og e er tykkelsen på røret. I utledning av denne formelen antas det at Poissons effekt og tregheten til røret er neglisjerbart [25].

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{K}{E}\right)\left(\frac{D}{e}\right)}} \quad 3.2$$

Disse likningene gjelder når lukketiden t_c på spjeldet er mindre enn gitt i likning 3.3. Her er L lengden på røret og a er trykkbølgens hastighet slik gitt i likning 3.2. Et trykkstøt kan oppstå selv ved en lukketid som er lengre enn dette, men trykket blir redusert jo lengre tid lukkingen tar [24].

$$t_c < \frac{2L}{a} \quad 3.3$$

4. Analyse av kraftproduksjon

Funksjonen til det foreslåtte bølgekraftverket er å produsere kraft. Måten systemet produserer kraft på er ved å pumpe opp vann til et reservoar for deretter å konvertere denne potensielle energien til elektrisitet ved hjelp av en vannturbin. Det er dermed av stor viktighet å vite hvordan en vannturbin forandrer den potensielle energien i vann til elektrisitet. Dette kan oppsummeres gjennom likning 4.1. Q er strømningsmengden, H er høyden fra reservoar til turbin, g er tyngdekraftens akselerasjon, ρ er tettheten til vann og η er en tapskoeffisient. Tapskoeffisienten varierer med type turbin som er benyttet. En tapskoeffisient på 1 tilsier at turbinen konverterer all potensiell energi i vann til elektrisitet. Det eksisterer turbiner med en tapskoeffisient på 0,9 og denne verdien benyttes videre i utregninger [26].

$$P = Q\rho Hg\eta \quad 4.1$$

Slik sett av likning 4.1 er reservoarhøyden H og strømningsmengden Q de eneste variablene som kan påvirke kraftproduksjonen. Strømningsmengden Q tilsier mengden med volum som blir transportert per sekund fra reservoaret og til turbinen, og er konstant over en periode. Systemet vil ha sykluser der det pumper, og sykluser der det ikke pumper. Dette vil si at strømningsmengden fra innløpsrøret og opp til reservoaret ikke er konstant. Volumet pumpet V opp til reservoaret dividert med tiden mellom hver gang et volum V blir pumpet gir strømningsmengden Q . Tiden mellom hver gang et volum V blir pumpet er gitt av bølgeperioden t_2 og strømningsmengden Q og kan beskrives av likning 4.2

$$Q = \frac{V}{t_2} \quad 4.2$$

Ved å sette likning 4.2 inn i likning 4.1 kan et uttrykk for kraftproduksjonen settes opp i likning 4.3.

$$P = \frac{V}{t_2} \rho Hg\eta \quad 4.3$$

Den ukjente i likning 4.3 er volumet V som pumpes opp til reservoaret. Dette volumet må finnes, og for å finne dette benyttes Bernoullis likning. Bernoullis likning er gitt ved likning 4.4 for en substans som ikke kan bli komprimert og ved en konstant strømning. Her er p trykket, v er hastigheten, ρ er tettheten, g er tyngdekraftens akselerasjon og z er høyden.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{Konstant} \quad 4.4$$

Den konstante Bernoulli likningen kan ikke alltid benyttes og den ustabile Bernoulli likningen er nødvendig for å finne volum V . Den ustabile Bernoulli likningen er satt opp i likning 4.5. Likningen beskriver hvordan trykket forandrer seg som funksjon av en variabel tetthet og hvordan hastigheten forandrer seg som hensyn av tid t og posisjon s [27].

$$\int \frac{dp}{\rho} + \int \frac{\partial v}{\partial t} ds + \frac{v^2}{2} + gz = \text{Konstant} \quad 4.5$$

Bernoulli likningene tar ikke hensyn til tap på grunn av friksjon slik de er satt opp i likning 4.4 og 4.5. Tap legges inn i likningene ved hjelp av en tapfaktor h_L , gitt av likning 4.6. Denne faktoren legges til på den ene siden av Bernoulli likningen. Her er L lengden på røret, v er hastigheten i røret, g er tyngdekraftens akselerasjon, f er en friksjonsfaktor og D er diameteren på røret.

$$h_L = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad 4.6$$

Friksjonsfaktoren f vil være variere avhengig om strømmingen er turbulent eller laminær. Reynolds nummeret Re er en god indikasjon på om strømming er laminær eller turbulent. Ved et Reynolds nummer under 2000 er strømmingen i et sirkulært rør laminær, og ved et Reynolds nummer over 4000 vil strømmingen være turbulent. Reynoldsnummeret Re er gitt av formelen 4.7. μ er den dynamiske viskositeten til vann.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad 4.7$$

I dette systemet vil strømmingene alltid være turbulente da hastigheten v og diameteren D er for store til at et Reynoldsnummer under 4000 vil oppstå. Likning 4.8 viser Colebrook likningen, dette er en implisitt likning for friksjonsfaktoren f for turbulente strømminger. En eksplisitt approksimasjon av denne likningen er gitt i likning 4.9. ε er overflate ruhet og D er diameteren på røret.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad 4.8$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1,8 \log \left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} \right)^{1,11} \right) \quad 4.9$$

Ved hjelp av litt algebra kan f skrives på formen gitt i likning 4.10.

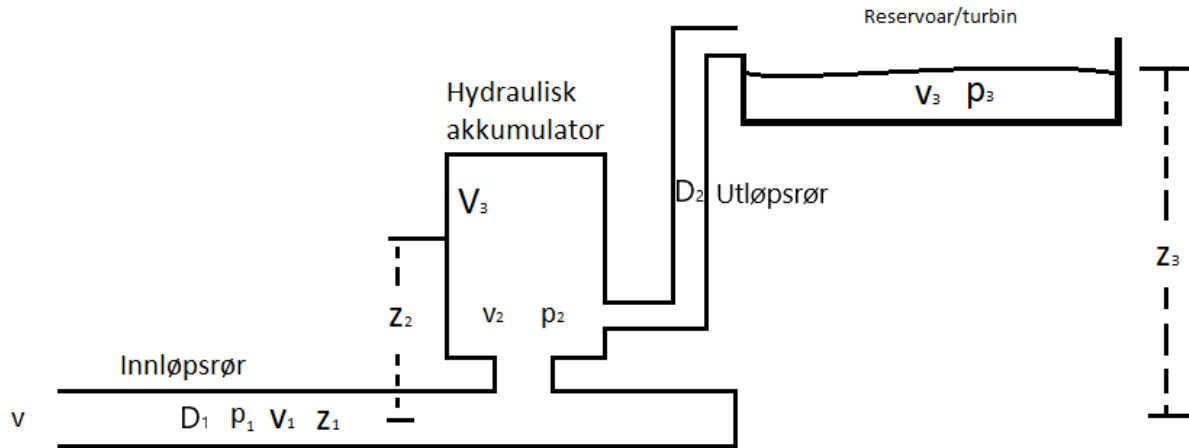
$$f \cong \left(\frac{1}{-1,8 \log \left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} \right)^{1,11} \right)} \right)^2 \quad 4.10$$

Ved å sette inn Reynoldsnummeret Re kan likning 4.10 skrives som likning 4.11.

$$f \cong \left(\frac{1}{-1,8 \log \left(\frac{6,9}{\frac{\rho v D}{\mu}} + \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} \right)^{1,11} \right)} \right)^2 \quad 4.11$$

Systemet pumper vann ved hjelp av to forskjellige mekanismer. Den første mekanismen er når tilbakeslagsventilen er åpen og vannet strømmer direkte opp i reservoaret uten å bli lagret i den hydrauliske akkumulatoren først. Den andre mekanismen er når tilbakeslagsventilen er lukket og strømmen av vann oppover er drevet av trykket i den hydrauliske akkumulatoren.

Figur 15 viser systemet med innløpsrør, hydraulisk akkumulator og reservoar. Trykk p , hastighet v , volum V , diameter D og høyden z er illustrert i figuren. Nullpunktet til den potensielle energien er tatt ved midtpunktet til innløpsrøret.



Figur 15: Systemet med utløpet til reservoar (3), innløpsrør (1) og hydraulisk akkumulator (2).

Bølgehastigheten i innløpsrøret reduseres på grunn av friksjon. Dette tapet kan finnes ved å bruke Bernoulli likningen med tapsfaktoren slik sett av likning 4.12. Her er v den originale bølgehastigheten uten noen form for tap, og v_1 er hastigheten etter at friksjon har redusert hastigheten. Merk at denne hastigheten v_1 er hastigheten før spjeldet stenges.

$$\frac{v^2}{2} = \frac{v_1^2}{2} + gh_L \quad 4.12$$

v_1 kan settes på form slik illustrert i likning 4.13.

$$v_1 = \sqrt{v^2 - f_1 \frac{L_1 v^2}{D_1 g}} \quad 4.13$$

Friksjonsfaktoren f_1 gitt av likning 4.11 settes inn i likning 4.13 for å få likning 4.14. ρ_1 er tettheten til vann.

$$v_1 = \sqrt{v^2 - \left(\frac{1}{-1,8 \log \left(\frac{6,9}{\frac{\rho_1 v D_1}{\mu}} + \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D_1} \right)^{1,11} \right)} \right)^2 \frac{L_1 v^2}{D_1 g}} \quad 4.14$$

Likningen 4.14 viser hastigheten vannet i innløpsrøret vil ha når det treffer spjeldet når friksjon har blitt tatt med i beregningen. Friksjonsfaktoren f_1 er en funksjon av hastigheten v_1 , men det er vanskelig å løse likningen for v_1 når den er brukt i uttrykket for friksjonsfaktoren. En forenkling som har blitt gjort er å benytte bølgehastigheten v i uttrykket for friksjonsfaktoren. Forskjellen i f_1 viser seg å være neglisjerbar med en variasjon av hastigheten mellom 0 og 30 m/s.

4.1 Volum pumpet fra innløpsrør til reservoar.

Volumet med vann som pumpes opp til reservoaret kan finnes ved å anta at bare en av de to pumpemekanismene er aktive. Den første mekanismen benyttes med den ustabile Bernoulli likningen for å finne dette volumet. Den hydrauliske akkumulatoren neglisjeres i denne beregningen, og vannet går direkte fra innløpsrøret til reservoaret.

Den vanlige Bernoulli likningen kan ikke benyttes ettersom vannet ikke vil få tilstrekkelig tid til å akselerere til maksimumshastigheten den kan oppnå. Trykket er konstant i henhold til tettheten, og dp/ρ kan skrives som p/ρ . I tillegg til faktorene som inngår i Bernoulli likningen inngår også en tapfaktor h_L i likningen. Den ustabile Bernoulli likningen som beskriver innløpsrøret og reservoaret gitt i likning 4.15.

$$\frac{p}{\rho} + \int \frac{\partial v}{\partial t} ds + \frac{v^2}{2} + gz + gh_L = \text{Konstant} \quad 4.15$$

Likning 4.15 benyttes mellom innløpsrøret og reservoaret og likning 4.16 kan bli satt opp. Likningen representerer hva som skjer etter at trykkstøtet har oppstått i innløpsrøret og tilbakeslagsventilen er åpen. Integralet mellom 1 og 3 betyr lengden fra innløpsrøret og opp til reservoaret. v_{1t0} er hastigheten i innløpsrøret etter at trykkstøtet har oppstått. Resten av variablene er illustrert i figur 15, og t_c er lukketiden til spjeldet.

$$\int_1^3 \frac{\rho_1 \partial v_s}{t_c} ds + \frac{v_{1t0}^2 \rho_1}{2} + \rho_1 g z_1 + p_1 - \left(\frac{v_3^2 \rho_1}{2} + \rho_1 g z_3 + p_3 + \rho_1 g h_L \right) = 0 \quad 4.16$$

Variablene z_3 , v_{1t0} og p_3 er null eller neglisjerbare. Tapsfaktoren h_L fra likning 4.6 settes inn og trykkstøtlikningen 3.1 settes inn for p_1 for å få likning 4.17.

$$\int_1^3 \frac{\rho_1 \partial v_s}{\partial t_c} ds + v_1 a \rho_1 - \left(\frac{v_3^2 \rho_1}{2} + \rho_1 g z_3 \right) - f_2 \frac{L_2 v_3^2 \rho_1}{D} = 0 \quad 4.17$$

Tettheten ρ_1 faller bort som fører til likning 4.18.

$$\int_1^3 \frac{\partial v_s}{\partial t_c} ds + v_1 a - \left(\frac{v_3^2}{2} + g z_3 \right) - f_2 \frac{L_2 v_3^2}{D} = 0 \quad 4.18$$

Integralet er behandlet separat fra resten av uttrykket for å få klarhet i hvordan det er regnet ut. Integraluttrykket for ∂v_s er gitt i likning 4.19. Avstanden mellom 1 og 3 kan sees på som z_3 . v_s kan sees på som forskjellen mellom hastigheten på lokasjon 1 og lokasjon 3, og vil være v_3 ettersom v_{1t0} er null.

$$\int_1^3 \frac{\partial v_s}{\partial t_c} ds = \int_0^{z_3} \frac{\partial v_3}{\partial t_c} ds = \frac{z_3 \partial v_3}{\partial t} \quad 4.19$$

Likning 4.19 kan settes inn i likning 4.18 for å få likning 4.20.

$$\frac{z_3 \partial v_3}{\partial t_c} + v_1 a - \left(\frac{v_3^2}{2} + g z_3 \right) - f_2 \frac{L_2 v_3^2}{D} = 0 \quad 4.20$$

Det er ønskelig å få ∂t_c og ∂v_3 alene, og ved hjelp av litt algebra kan uttrykket i likning 4.21 settes opp.

$$\frac{\partial t_c}{z_3} = \frac{\partial v_3}{\frac{v_3^2}{2} + g z_3 - v_1 a + f_2 \frac{L_2 v_3^2}{D}} \quad 4.21$$

Det integreres på venstre side fra null til t_c med hensyn på t_c og fra null til v_3 med hensyn på v_3 på høyreside av likning 4.22.

$$\int_0^{t_c} \frac{\partial t_c}{z_3} = \int_0^{v_3} \frac{\partial v_3}{\frac{v_3^2}{2} + gz_3 - v_1 a + f_2 \frac{L_2 v_3^2}{D}} \quad 4.22$$

Integralet for v_3 er for komplisert til å løse for hånd, og dette har dermed blitt gjort ved hjelp av datamaskinen. Ingen utledning for løsningen av integralet er dermed gitt. Ved å integrere uttrykkene på høyre og venstre side kan likning 4.23 settes opp. Friksjonsfaktoren f_2 er en funksjon av v_3 , men det blir for komplisert å ta med dette uttrykket i integralet og dette er dermed antatt å være uavhengig av v_3 . Forskjellen i f_2 viser seg å være neglisjerbar med en variasjon av hastigheten mellom 0 og 30 m/s.

$$\frac{t_c}{z_3} = \frac{-\sqrt{2}\sqrt{D_2} \operatorname{arctanh}\left(\frac{v_3(D_2 + L_2 f_2)}{\sqrt{2}\sqrt{D_2}\sqrt{D_2 + L_2 f_2}\sqrt{av_1 - gz_3}}\right)}{\sqrt{D_2 + L_2 f_2}\sqrt{av_1 - gz_3}} \quad 4.23$$

Y settes inn slik gitt i likning 4.24 for å gjøre likning 4.23 ryddigere. Likning 4.23 er gitt med Y i likning 4.25.

$$Y = \sqrt{D_2 + L_2 f_2}\sqrt{av_1 - gz_3} \quad 4.24$$

$$\frac{t_c}{z_3} = \frac{-\sqrt{2}\sqrt{D_2} \operatorname{arctanh}\left(\frac{v_3(D_2 + L_2 f_2)}{\sqrt{2}\sqrt{D_2}Y}\right)}{Y} \quad 4.25$$

Ved hjelp av algebra kan uttrykket i 4.25 settes opp som en funksjon for v_3 gitt av likning 4.26.

$$v_3 = \frac{\operatorname{tanh}\left(\frac{\frac{Y t_c}{z_3}}{-\sqrt{2}\sqrt{D_2}}\right)}{\frac{(D_2 + L_2 f_2)}{\sqrt{2}\sqrt{D_2}Y}} \quad 4.26$$

Produktet av strømningshastigheten v_3 og arealet A_2 gir strømningsmengden Q_3 slik gitt i likning 4.27. Her er strømningshastigheten v_3 konstant over en kort periode.

$$Q_3 = v_3 A_2 \quad 4.27$$

Volumet med vann som blir pumpet opp i en periode kan finnes ved å multiplisere strømningsmengden Q_3 med tiden t_c slik gitt i likning 4.28.

$$V = v_3 A_2 t_c = Q_3 t_c \quad 4.28$$

Likning 4.28 viser hvor mye den første perioden pumper opp, men det finnes flere perioder som har en lavere strømningshastighet. Strømningshastigheten vil bli redusert med $\frac{gz_3}{a}$ den andre perioden og ved $\frac{2gz_3}{a}$ ved den tredje og hver periode etter dette til strømningshastigheten er null. Likning 4.29 og 4.30 gir da det totale volumet med vann som er pumpet opp til reservoaret.

$$V = v_3 A_2 t_c + \left(v_3 - \frac{gz_3}{a}\right) A_2 t_c + \left(v_3 - \frac{2gz_3}{a}\right) A_2 t_c + \left(v_3 - 5\frac{gz_3}{a}\right) A_2 t_c \dots \quad 4.29$$

$$V = A_2 t_c \left(v_3 + v_3 - \frac{gz_3}{a} + v_3 - 3 \frac{gz_3}{a} + v_3 - 5 \frac{gz_3}{a} \dots \dots \right) \quad 4.30$$

Likning 4.29 og 4.30 er ufullstendige og burde skrives som rekker. Det vil være to forskjellige rekker, en for de to første periodene, og en for alle perioder etter den andre perioden. Disse rekkene er satt opp i likning 4.31 og 4.32. Her er n antall perioder i en syklus og vil alltid avrundes til høyeste heltall. V_1 indikerer volumet som er pumpet hvis antallet perioder er 2 eller mindre, og V_2 er volumet som blir pumpet hvis antallet perioder er over 2.

$$V_1 = A_2 t_c v_3 n - \frac{A_2 t_c g z_3}{a} (n - 1) \quad \text{for } n \leq 2 \quad 4.31$$

$$V_2 = A_2 t_c v_3 n - \frac{A_2 t_c g z_3}{a} - \frac{2 A_2 t_c g z_3 (n - 2)}{a} \quad \text{for } n > 2 \quad 4.32$$

Antall perioder i en syklus er ukjent, og et uttrykk for antall perioder må finnes.

Strømningshastigheten blir redusert med en konstant størrelse hver periode etter den første perioden. Det er mulig å dele den initiale strømningshastigheten v_3 på tapt strømningshastighet per periode for å finne antall perioder. Ettersom strømningshastigheten blir redusert med en forskjellig størrelse før og etter periode nr. 2 behøves det også her to likninger for å beskrive antall perioder.

Likningene som beskriver antall perioder er gitt i likning 4.33 og 4.34.

$$n = \frac{v_3}{\frac{gz_3}{a}} \quad \text{for } n \leq 2 \quad 4.33$$

$$n = 2 + \frac{v_3 - \frac{gz_3}{a}}{\frac{2gz_3}{a}} \quad \text{for } n > 2 \quad 4.34$$

Likning 4.33 og 4.34 for n settes inn i likning 4.31 og 4.32 for å få likning 4.35 og 4.36.

$$V_1 = A_2 t_c v_3 \frac{v_3}{\frac{gz_3}{a}} - \frac{A_2 t_c g z_3}{a} \left(\frac{v_3}{\frac{gz_3}{a}} - 1 \right) \quad \text{for } n \leq 2 \quad 4.35$$

$$V_2 = A_2 t_c v_3 \left(2 + \frac{v_3 - \frac{gz_3}{a}}{\frac{2gz_3}{a}} \right) - \frac{A_2 t_c g z_3}{a} - \frac{2 A_2 t_c g z_3 \left(\frac{v_3 - \frac{gz_3}{a}}{\frac{2gz_3}{a}} \right)}{a} \quad \text{for } n > 2 \quad 4.36$$

Likning 4.35 og 4.36 beskriver det totale volumet som blir pumpet opp i en pumpeyklus til reservoaret.

4.2 Kraft produsert

Ved å sette inn likning 4.36 inn i likning 4.3 kan likning 4.37 settes opp. Denne likningen representerer kraften som systemet kan produsere.

$$P = \frac{\rho H g \eta \left(A_2 t_c v_3 \left(2 + \frac{v_3 - \frac{gz_3}{a}}{\frac{2gz_3}{a}} \right) - \frac{A_2 t_c g z_3}{a} - \frac{2A_2 t_c g z_3 \left(\frac{v_3 - \frac{gz_3}{a}}{\frac{2gz_3}{a}} \right)}{a} \right)}{t_2} \quad 4.37$$

$\frac{\pi D_2^2}{4}$ settes for arealet A_2 , H byttes ut med z_3 og ρ byttes ut med ρ_1 i likning 4.37 for å få likning 4.38.

$$P = \frac{\rho_1 z_3 g \eta \left(\frac{\pi D_2^2}{4} t_c v_3 \left(2 + \frac{v_3 - \frac{gz_3}{a}}{\frac{2gz_3}{a}} \right) - \frac{\pi D_2^2 t_c g z_3}{4a} - \frac{\pi D_2^2 t_c g z_3 \left(\frac{v_3 - \frac{gz_3}{a}}{\frac{2gz_3}{a}} \right)}{2a} \right)}{t_2} \quad 4.38$$

Likning 4.38 representerer hvor mye kraft systemet kan produsere, men det finnes to ting som begrenser gyldighetsområdet til likningen. Likningen sier at det kan pumpes opp mer masse enn det som eksisterer i innløpsrøret. Etter at varigheten på pumpesyklusen t_s overstiger bølgeperioden t_2 er ikke likningen fysisk gjeldende. Mekanismen skaper en ny pumpesyklus med en varighet t_s hver bølgeperiode t_2 , men på dette tidspunktet kan pumpingen fra forrige syklus fortsatt pågå.

For å ta hensyn til disse begrensningene kan et sett med likninger benyttes som må være oppfylt for at likning 4.38 skal gjelde. Likning 4.39 sier at systemet kan maksimalt produsere en kraft tilsvarende til massen i innløpsrøret løftet til reservoarhøyde z_3 . Likning 4.40 beskriver varigheten av pumpesyklusen t_s . Denne varigheten kan ikke overstige t_2 .

$$P_{max} = L_1 D_1^2 \frac{\pi}{4} \rho_1 z_3 g \eta \quad 4.39$$

$$t_s = n t_c = \frac{2L_1}{a} \left(2 + \frac{v_3 - \frac{gz_3}{a}}{\frac{2gz_3}{a}} \right) < t_2 \quad 4.40$$

5. Utregninger

I denne seksjonen tallfestes størrelsen på kraftproduksjonen og påvirkningen de forskjellige variablene har på kraftproduksjonen er illustrert. Det blir i tillegg gjort en utregning for å finne det nødvendige volumet en hydraulisk akkumulator må ha for å fungere som en energilagingsenhet.

5.1 Kraftproduksjon

For å kunne benytte likning 4.38 til å beregne hvor mye kraft systemet kan produsere må det gjøres noen antagelser om hvordan systemet er dimensjonert. I tillegg til dette må også hastigheten til bølgene finnes. Denne hastigheten kan finnes ved å benytte formelen for u gitt av tabell 1. Det er benyttet bølgedata gjort tilgjengelig av Statoil fra Jærens Rev ved Stavanger, gitt i vedlegg B. Dette datasettet oppgir amplituden a og perioden t til bølgene hver time over mange år.

Gjennomsnittsverdiene for amplituden og perioden t fra dette datasettet er 1,74 m og 8,73 s.

Likningene for grunne bølger er benyttet da systemet er plassert ved kysten. For å beregne den horisontale partikkelbevegelsen u til bølgene er det antatt at dybden d er 2 m. Vinkelfrekvens ω og bølgenummeret k er en annen måte å representere perioden og bølgelengden på. Sammen med «dispersion relation» som er en sammenheng mellom ω og k kan k representeres. Vinkelfrekvensen ω er gitt i likning 5.1, og bølgenummeret k er gitt i likning 5.2.

$$\omega = \frac{2\pi}{t} = 0,7197s^{-1} \quad 5.1$$

$$k = \sqrt{\frac{\omega^2}{gd}} = 0,162m^{-1} \quad 5.2$$

Den horisontale partikkelbevegelsen v er gitt i likning 5.3. Merk at dette er den maksimale hastigheten partiklene kan oppnå. Denne verdien er funnet ved en dybde på 2 meter, og vil være en av de mest optimale dybdene en enhet realistisk kan plasseres på.

$$v = \frac{\omega a}{kd} = \frac{3,843m}{s} \quad 5.3$$

For å gjøre en undersøkelse av hvordan de forskjellige variablene påvirker kraftproduksjonen er dimensjonene til systemet antatt. Det er antatt at materialet som blir benyttet i rørene er en type stål. Variablene som er antatt er gitt i tabell 2, her er også konstantene som er benyttet tatt med.

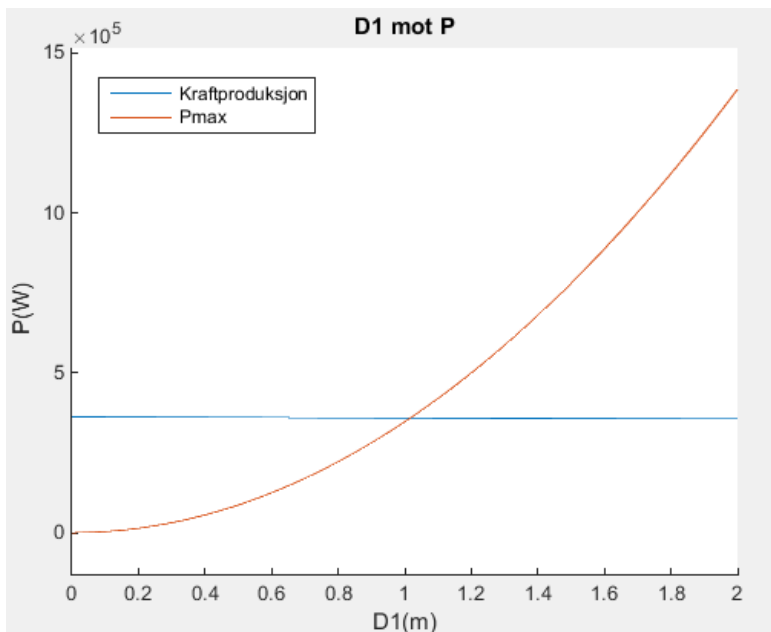
Tabell 2: Variabler og konstanter benyttet til utregning av kraftproduksjon og grenseverdier.

Enhet	Verdi
Bulk modulus vann (K)	2,2 GPa
E-modulus innløpsrør (E)	210 GPa
Innløpsrør tykkelse (e)	0,025 m
Vanns tetthet (ρ_1)	1000 kg/m ³
Reservoarhøyde (z_3)	10 m
Utløpsrør lengde (L_2)	10 m
Innløpsrør lengde (L_1)	20 m
Innløpsrør diameter (D_1)	1 m
Utløpsrør diameter (D_2)	1 m
Ruhet (ε)	0,045*10 ⁻³ mm
Dynamisk viskositet vann (μ)	1,519 e-3 Pa*s
Tyngdekraftens akselerasjon (g)	9,81 m/s ²

Effektivitet (η)	0,9
Tid (t_2)	8,7308 s
Hastighet bølger (v)	3,843 m/s
Antatt hastighet friksjon	5 m/s

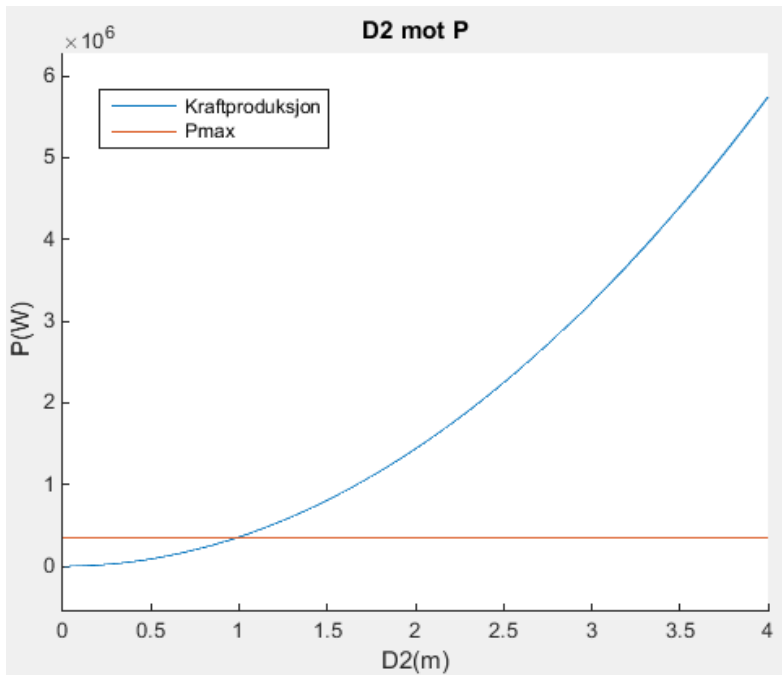
Forandringen i kraftproduksjonen og grenseverdien P_{max} er illustrert ved hjelp av grafer. Det er ikke alle variablene fra tabell 2 som er satt opp ettersom mange av variablene ikke påvirker kraftproduksjonen eller grensebetingelsene i en stor grad. I hver av grafene finnes det to funksjoner, P_{max} og kraftproduksjonen. P_{max} er illustrert ved oransje farge og kraftproduksjonen er illustrert ved en blå farge. Kraftproduksjon funksjonen slik gitt av likning 4.38 beskriver hvor mye kraft systemet kan produsere. Den laveste verdien av P_{max} og kraftproduksjon funksjonen er den gjellende funksjonen som beskriver hvor mye kraft systemet kan produsere. I noen tilfeller vil kraftproduksjonen kunne produsere mye mer kraft enn det som er fysisk mulig, men andre ganger vil ikke systemet greie å nå maksimumsgrensen for kraftproduksjon gitt av P_{max} .

Figur 16 illustrer hvordan kraftproduksjonen og P_{max} forandrer seg med innløpsdiameteren D_1 . Forandringen i kraftproduksjon er neglisjerbar ved en forandring i diameteren D_1 . Dette er i motsetning til P_{max} som øker mye ved en økende diameter D_1 . Denne økningen er kraftig jo større diameteren er, og er ikke veldig betydelig ved små diametere. Dette skyldes at når D_1 øker, øker volumet i innløpsrøret og dermed også masse som er tilgjengelig i systemet.



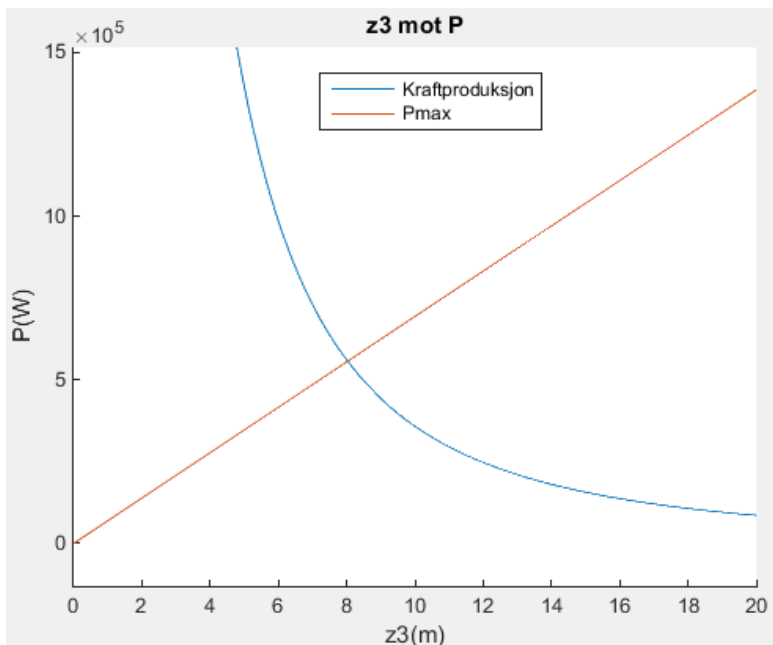
Figur 16: Graf over innløpsdiameter D_1 (m) mot kraftproduksjon $P(W)$.

Figur 17 illustrer hvordan kraftproduksjonen forandrer seg som funksjon av utløpsdiameteren D_2 . I motsetning til innløpsdiameteren har utløpsdiameteren mye å si på kraftproduksjonen, men ingenting å si på P_{max} .



Figur 17: Graf over utløpsdiameter D_2 (m) mot kraftproduksjon $P(W)$.

Figur 18 viser hvordan kraftproduksjonen forandrer seg med hensyn på reservoarhøyden z_3 . Kraftproduksjonen blir redusert ved en økning av reservoarhøyden, denne reduksjonen er størst ved små høyder. P_{max} øker lineært ved en økende høyde. Reservoarhøyden er en av tre variabler som kan øke P_{max} og er derfor en viktig variabel.

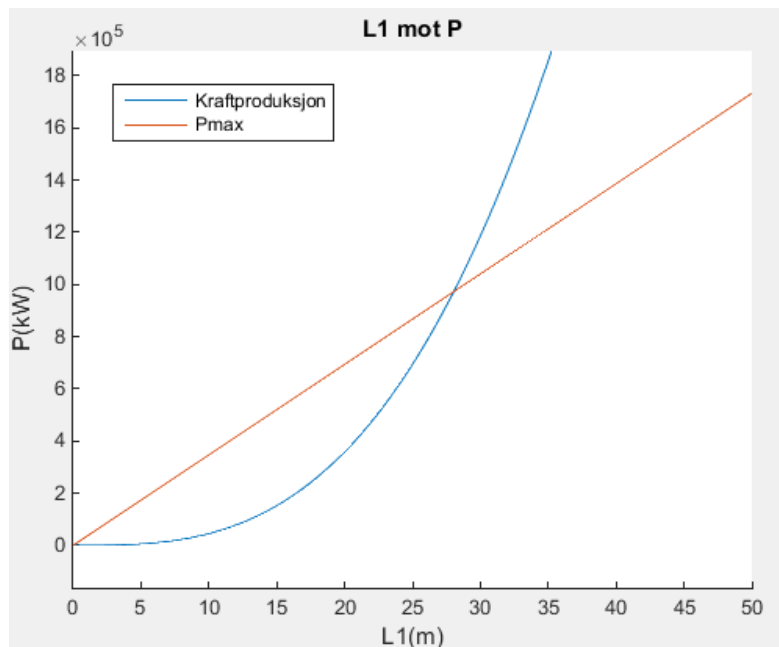


Figur 18: Graf over reservoarhøyde z_3 (m) mot kraftproduksjon $P(W)$.

Ved grafene for v og L_1 kan det oppstå feil i verdien for kraft når systemet beveger seg vekk fra de originale verdiene. Dette ettersom disse variablene øker varigheten på pumpesyklusen og vil føre til at likning for kraftproduksjon 4.38 når et punkt der den ikke er fysisk gjeldende lengre. Grafene viser

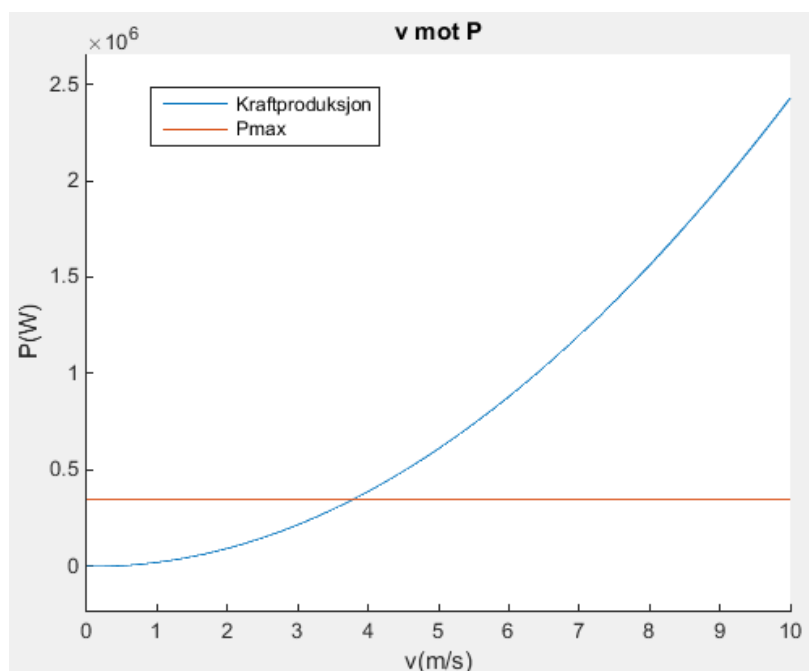
den riktige trenden og påvirkningen disse variablene har på kraftproduksjonen til systemet, men ikke nødvendigvis den riktige tallverdien.

Figur 19 viser innløpsrørets lengde L_1 mot kraft produsert. Her er kraftproduksjonen lavere enn P_{max} opp til et punkt, og etter dette punktet er det P_{max} som bestemmer hvor mye kraft som kan produseres. L_1 er en av de viktigste variablene i dette systemet.



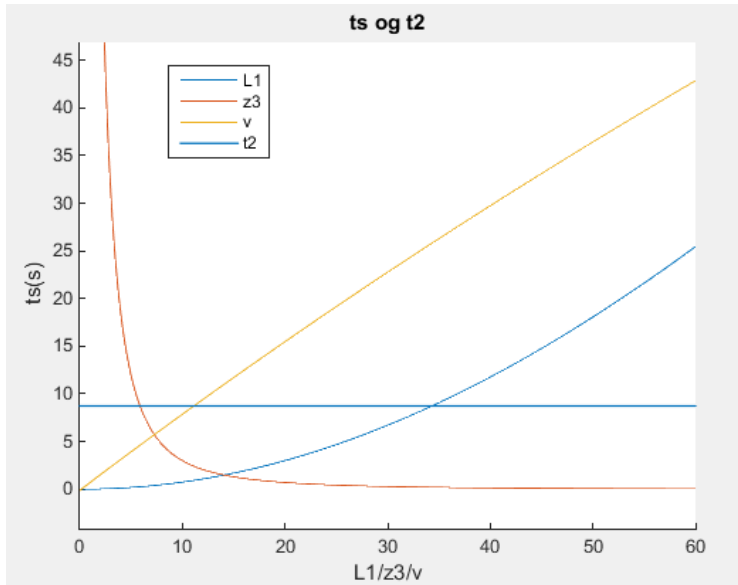
Figur 19: Graf over innløpslengde L_1 (m) mot kraftproduksjon P (W).

Figur 20 illustrer påvirkningen innløpshastighetene v har på systemet. Kraftproduksjonen øker kraftig med en økende innløpshastighet, men P_{max} forandrer seg ikke med hastigheten. Økningen i kraftproduksjonen er sterkt begrenset på grunn av massebevarelse. Det er dermed ingen poeng i å øke innløpshastigheten hvis ikke P_{max} kan øke tilsvarende.



Figur 20: Graf over innløpshastighet v (m/s) mot kraftproduksjon P (W).

Figur 16 – 20 illustrerer hvordan de viktigste variablene påvirker systemets kraftproduksjon og grenseverdien P_{max} . Figurene mangler informasjon om den andre grenseverdien t_s . Det er viktig å vite hvordan variablene påvirker den andre grenseverdien t_s slik at den ikke overstiger bølgeperioden t_2 . Sammenhengene mellom grenseverdien t_s og variablene som styrer denne er satt opp som en graf i figur 21.



Figur 21: Pumpesyklusen t_s gitt mot innløpslengden L_1 , reservoarhøyden z_3 , innløpshastigheten v og den konstante bølgeperioden t_2 .

Slik figur 21 illustrerer vil en økning av v eller L_1 fører til at pumpesyklusen t_s øker, mens en økning av z_3 reduserer pumpesyklusen t_s . Dette tilsier at en økning av v eller L_1 må etterfølges av en økning i reservoarhøyden z_3 for å holde pumpesyklusen t_s under bølgeperioden t_2 .

Slik figur 16 – 21 illustrerer vil systemet overgå grenseverdiene hvis disse ikke tas hensyn til. Ved f.eks. en økning av v kan det virke som at systemet får en kraftig økning i kraftproduksjonen, men i virkeligheten vil denne økningen bli stoppet av grenseverdien P_{max} . P_{max} og pumpesyklusen t_s er kritiske funksjoner som systemet må designes rundt for å få en optimal kraftproduksjon.

Variablene som forandrer P_{max} er L_1 , D_1 og z_3 . Variablene som forandrer pumpesyklusen t_s er L_1 , v_1 og z_3 . Av disse variablene er det bare innløpshastigheten v som ikke kan direkte kontrolleres, men som forandrer seg uavhengig av resten av systemet. Hvis alle andre verdier er konstante vil dette da føre til at systemet pulserer over og under grenseverdiene. Dette er uønskelig da systemet ikke fungerer optimalt ved en slik situasjon. Noen av de andre variablene må kunne varieres for å ta hensyn til at hastigheten forandrer seg slik at kraftproduksjonen kan maksimeres.

Variablene som inngår i både funksjonene for grenseverdiene og funksjonen for kraftproduksjon er v , z_3 , L_1 , D_1 og t_2 . v og t_2 forandres av havet og kan ikke kontrolleres. D_1 påvirker bare grenseverdien P_{max} , og ikke kraftproduksjonen i stor grad. Det er dermed bare L_1 og z_3 som påvirker alle funksjonene. Disse variablene påvirker kraftproduksjonen, P_{max} og pumpesyklusen t_s på forskjellige måter. L_1 øker kraftproduksjonen, P_{max} og pumpesyklusen t_s . z_3 reduserer kraftproduksjonen, øker P_{max} og reduserer pumpesyklusen t_s .

Dette vil si at en økning i L_1 er positivt for P_{max} og kraftproduksjonen, men negativt for pumpesyklusen og drar denne grenseverdien i feil retning. Hvis L_1 reduseres er dette positivt for en

av grenseverdiene, men negativt for kraftproduksjonen og den andre grenseverdien. Dette fører til at selv om en av grenseverdiene blir bedre, kan kraftproduksjonen som en helhet reduseres.

En økning i z_3 reduserer pumpesyklusen t_s , øker P_{max} og reduserer kraftproduksjonen. Denne verdien er fordelaktig for begge grenseverdiene, men negativ for kraftproduksjonen. Hvis kraftproduksjonen allerede er begrenset av en av grenseverdiene vil en reduksjon av kraftproduksjonen være ubetydelig. Hvis derimot grenseverdien som begrenser kraftproduksjonen blir påvirket på positiv måte vil dette føre til en faktisk øking av kraft produsert. z_3 burde være variabel for å kontrollere systemets kraftproduksjon på en effektiv måte.

D_2 og z_3 påvirker volumet til utløpsrøret. Ved et stort utløpsvolum vil det ta tid fra systemet starter å pumpe til vannet kommer frem til reservoaret. Dette ettersom utløpsvolumet må bli fylt med vann før reservoaret kan bli fylt. Ved et større utløpsvolum kan det ta flere pumpesykluser før utløpsrøret er tilstrekkelig fylt med vann. Dette betyr at ved en økning av reservoarhøyden z_3 bruker systemet noen pumpesykluser til å pumpe vann inn i utløpsrøret før det når reservoaret.

Det er ikke bare hastigheten v som forandrer seg, men t_2 kan også økes eller minskes tilfeldig. Denne variasjonen fører i likhet med innløpshastigheten til at reservoarhøyden burde forandres dynamisk for å maksimere kraftproduksjonen.

5.2 Hydraulisk akkumulator størrelse

Et alternativ til å benytte et reservoar for å lagre energi er å benytte en hydraulisk akkumulator og lagre energien som trykkluft. Utfordringen med en slik akkumulator er at energien er avhengig av volumet med luft som er komprimert. Ettersom vann pumpes ut av akkumulatoren vil trykket bli redusert og det kan oppstå en situasjon der det ikke er et tilstrekkelig høyt lufttrykk til å pumpe vann til en ønsket høyde.

For å regne ut volumet av den hydrauliske akkumulatoren må volumet og trykket kobles sammen. Dette kan gjøres gjennom den ideelle gas loven gitt ved likning 5.4. I denne loven er trykk p relatert til volum V , temperatur T , masse m og en rekke konstanter som molar massen til luft M og gas konstanten R .

$$p = \frac{m RT}{V M} \quad 5.4$$

Lufttrykk skapes når luft komprimeres. Det antas at den hydrauliske akkumulatoren starter fylt av luft. Denne luften blir komprimert når trykkstøtet presser vann inn i akkumulatoren. Det antas at hele akkumulatoren, uansett størrelse vil bli fylt av vann i tiden trykkstøtet er aktivt. Luften i akkumulatoren vil være ved et høyt trykk og være så komprimert at volumet nærmer seg null. Dette er den best tenkelige situasjonen der lufttrykket i tanken begynner med en maksimal verdi.

Når trykkstøtet er over vil den hydrauliske akkumulatoren pumpe opp vann til reservoaret ved hjelp av et lufttrykk. Mengden med volum av vann V_3 som blir pumpet opp til reservoaret tilsier en økning av volum V_3 av luft i akkumulatoren. Massen til luften i tanken er gitt ved volumet av tanken V multiplisert med tettheten til luft ρ_2 ved atmosfærisk trykk. Ved å sette inn disse antagelsene i likning 5.4 kan likning 5.5 settes opp.

$$p_2 = \frac{m RT}{V_3 M} = \frac{\rho_2 V RT}{V_3 M} \quad 5.5$$

Trykket p_2 vil variere avhengig av hvor høyt vannet må pumpes, og kan finnes ved hjelp av Bernoulli likningen. Ved å anta at vannet skal pumpes til en reservoarhøyde z_3 på 10 m, ha en utløpshastighet

v_3 på 2 m/s ved atmosfærisk trykk p_3 kan likning 5.6 settes opp for p_2 . Variablene benyttet er illustrert i figur 15 i seksjon 4.

$$p_2 = p_3 + \frac{\rho_1 v_3^2}{2} + \rho_1 g z_3 = 200100 Pa \quad 5.6$$

Volumet V_3 vil variere avhengig av hvor mye kraft systemet produserer. Likning 4.3 er likningen for kraftproduksjon, men i motsetning til tidligere utregninger er nå V den ukjente. Likning 4.3 er satt opp med hensyn på V_3 i likning 5.7. Ved en kraftproduksjon P på 100 kW ved en reservoarhøyde på 10 m og en bølgeperiode t_2 på 8,7 s.

$$V_3 = \frac{P t_2}{\rho_1 z_3 g \eta} = 9,9 m^3 \quad 5.7$$

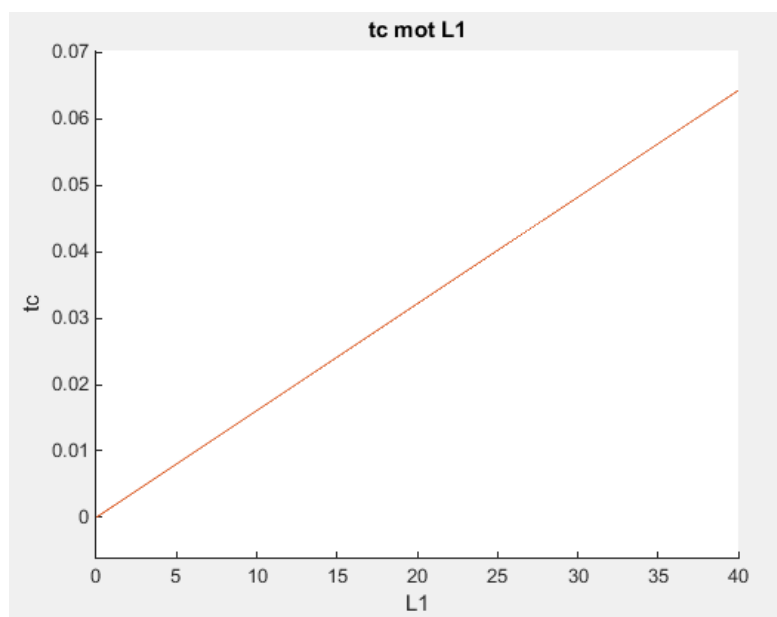
Volumet V den hydrauliske akkumulatoren må ha for å produsere et trykk p_2 når et volum V_3 av vann på $9.9 m^3$ skal pumpes ut gis av likning 5.8.

$$V = \frac{p_2 V_3 M}{RT \rho_2} = 19566 m^3 \quad 5.8$$

Dette viser at volumet i tanken er enormt og ikke er gjennomførbart. Her er det antatt at det initiale trykket i den hydrauliske akkumulatoren er lite. Dette fører til at volumet V blir større enn hvis et større initial trykk benyttes. Selv om dette er tilfellet vil det nødvendige volumet en hydraulisk akkumulator må ha for å lagre energi alt for stort til å være gjennomførbart.

5.3 Lukketid for lukkesystem

For at et trykkstøt skal kunne oppstå må strømmingen komme til en brå stopp innen en tid t_c slik gitt i likning 3.3. Ved bruk av et stålrør er a konstant ved omtrent 1400 m/s og det er bare innløpslengden L_1 som påvirker hvor stor t_c blir. Figur 22 viser hvordan lukketiden t_c forandres med innløpslengden L_1 . Slik figuren illustrer er lukketiden t_c som er nødvendig for å skape et trykkstøt kort ved lave innløpslengder L_1 . Ved en lukketid t_c på 0,06 s og en innløpsdiameter D_1 på 1 m må et spjeld bevege seg i 16,7 m/s for å kunne produsere et trykkstøt. Et system vil dermed ha vanskeligheter med å fungere ved lave verdier for L_1 , og D_1 må reduseres tilsvarende for at systemet skal fungere.



Figur 22: Lukketid t_c mot innløpslengde L_1

6. Spenningsberegning.

Et trykkstøt produserer et stort trykk, men dette trykket forsvinner ut av innløpsrøret via den hydrauliske akkumulatoren. Ved en feil på tilbakeslagsventilen der den ikke åpner seg vil dette trykket ikke forsvinne, men forbli i innløpsrøret. Det er derfor av interesse å finne ut hvor store spenninger som oppstår i et materiale hvis tilbakeslagsventilen ikke åpnes. «Lames likninger» kan benyttes til å finne spenningene i den tangentielle og den radielle retningen.

Spenningene i innløpsrøret som vil oppstå finnes i en verst tenkelig situasjon. Det er benyttet en gjennomsnittshastighet som er åtte ganger så stor som verdien som ble benyttet i utregningene for kraftproduksjon. En åttedobling av gjennomsnittshastigheten er 30,7 m/s. Trykket som oppstår på grunn av et trykkstøt i et stålrør er gitt av likning 6.1

$$\Delta p = \pm \rho a V = 43,03 \text{ MPa} \quad 6.1$$

For å finne spenningen i innløpsrøret kan Lames likninger benyttes. Disse likningene er gitt i likning 6.2 og 6.3. σ_{rr} og $\sigma_{\theta\theta}$ er radial og tangentiell spenning, A og B konstanter og r er radiusen der spenningen skal finnes. Det er antatt at innløpsrøret er åpent, og at temperaturen er konstant.

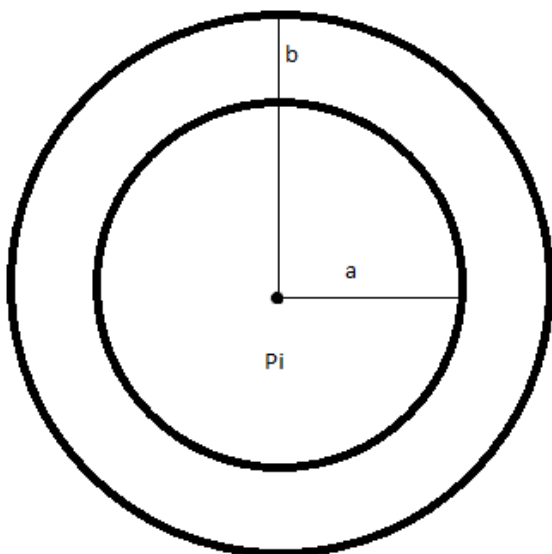
$$\sigma_{rr} = A - \frac{B}{r^2} \quad 6.2$$

$$\sigma_{\theta\theta} = A + \frac{B}{r^2} \quad 6.3$$

Konstantene A og B kan finnes med hjelp av grensebetingelsene ved a og b slik illustrert i figur 23. b er den ytre radiusen og a er den indre radiusen, det er et innvendig trykk P_i og ingen utvendig trykk. Likningen 6.2 benyttes til å finne konstantene A og B . Likning 6.4 setter inn a for r og P_i for σ_{rr} , dette kan uttrykkes for A slik likning 6.5 viser.

$$P_i = A - \frac{B}{a^2} \quad 6.4$$

$$A = \frac{B}{a^2} + P_i \quad 6.5$$



Figur 23: Sylinder som representerer innløpsrøret med et indre trykk P_i , a er indre radius og b er ytre radius.

For å finne konstant B benyttes likning 6.2. Grensebetingelsene satt opp i likning 6.6 er en spenning $\sigma_{rr} = 0$ ved en radius b .

$$0 = A - \frac{B}{b^2} \quad 6.6$$

A i likning 6.5 settes inn i likning 6.6 for å få likning 6.7. Likning 6.7 til 6.10 er en utledning som viser hvordan B kan settes opp.

$$0 = \frac{B}{a^2} + P_i - \frac{B}{b^2} \quad 6.7$$

$$0 = P_i + B \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \quad 6.8$$

$$0 = P_i + B \left(\frac{b^2 - a^2}{a^2 b^2} \right) \quad 6.9$$

$$B = \frac{-P_i(a^2 b^2)}{b^2 - a^2} \quad 6.10$$

For å forenkle uttrykket i likning 6.10 settes $k=a/b$ inn for å få likning 6.11.

$$B = \frac{-P_i a^2}{1 - k^2} \quad 6.11$$

B i likning 6.11 er satt inn i likning 6.5 for å finne A i ligning 6.12 og 6.13.

$$A = P_i - \frac{P_i}{1 - k^2} \quad 6.12$$

$$A = P_i \left(1 - \frac{1}{1 - k^2} \right) \quad 6.13$$

Begge konstante A og B er nå kjente og de kan settes inn i likning 6.2 og 6.3 for å få det endelige resultatet for radielle og tangentielle spenninger gitt i likning 6.14 og 6.15.

$$\sigma_{rr} = P_i \left(1 - \frac{1}{1 - k^2} \right) + \frac{P_i a^2}{r^2(1 - k^2)} \quad 6.14$$

$$\sigma_{\theta\theta} = P_i \left(1 - \frac{1}{1 - k^2} \right) - \frac{P_i a^2}{r^2(1 - k^2)} \quad 6.15$$

I tillegg til disse spenningene finnes det også aksiale spenninger da innløpsrøret vil være en lukket sylinder når spjeldet eller ventilen lukkes. Spenningen for denne likningen er gitt direkte i likning 6.16. Ved utregning av de radielle og tangentielle spenningene er det antatt at sylinderen var åpen for å forenkle beregninger. Dette er overslagsberegninger, og tapet av detaljer er ikke viktig.

$$\sigma_{zz} = \frac{P_i a^2}{b^2 - a^2} \quad 6.16$$

Det settes inn verdier for a , b , P_i og k ved $a = 500$ mm, $b = 525$ mm, $P_i = 43,04$ MPa og $k = 500/525 = 0,95$. Tallverdiene for spenningene ved disse dimensjonene og trykk er gitt i likning 6.17, 6.18 og 6.19.

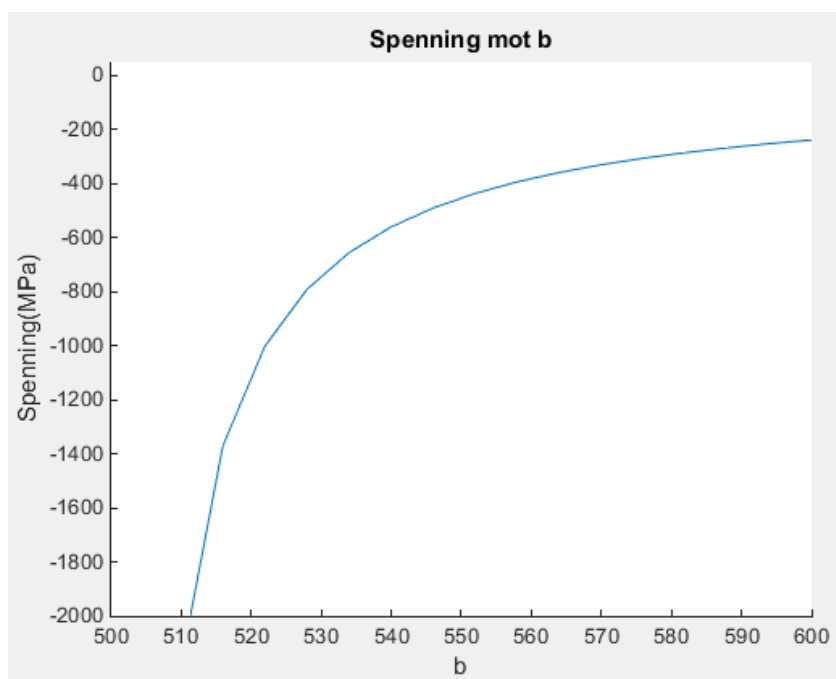
$$\sigma_{rr} = 43,04 \text{ MPa} \quad 6.17$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -882,72 \text{ MPa} \quad 6.18$$

$$\sigma_{zz} = 419,84 \text{ MPa} \quad 6.19$$

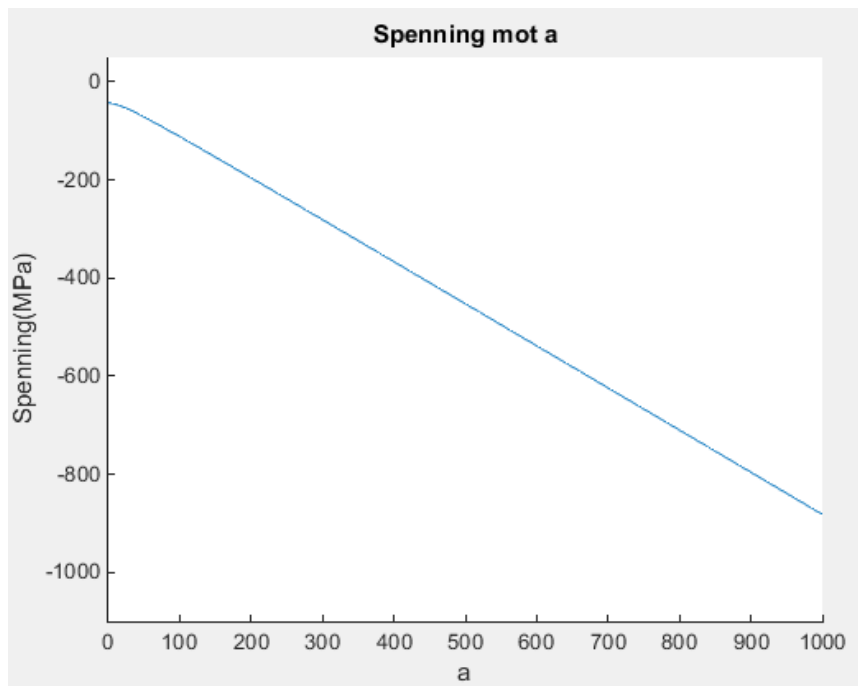
Den radielle spenning er veldig liten i forhold til de tangentielle spenningene. De tangentielle spenningene er igjen dobbelt så store som de aksielle spenningene. Videre vil forandringer i dimensjoner bli illustrert ved den tangentielle spenningen.

Figur 24 illustrerer hvordan den tangentielle spenningen forandrer seg som funksjon av b . a er konstant på 500 mm, mens b går fra 500 mm til 600 mm. Dette betyr at figuren illustrerer tykkelsen på sylindringen, der en tykkelse på 0 mm vil være en b på 500 mm. Ved en tykkelse på 25 mm vil spenningen være omtrent 800 MPa, mens spenningen ved en tykkelse på 50 mm vil være 400 MPa.



Figur 24: Tangentiellspenning $\sigma_{\theta\theta}$ mot den ytre radiusen b . $b = a$ ved 500, og grafen representerer derfor spenning mot tykkelse.

Figur 25 viser den tangentielle spenningen i innløpsrøret mot den innvendige radiusen a . Spenningen mot den innvendige radiusen har et lineært forhold slik figuren illustrer. En dobling av radiusen er omtrent en dobling av spenningen.



Figur 25: Tangentiell spenning $\sigma_{\theta\theta}$ mot den indre radiusen a .

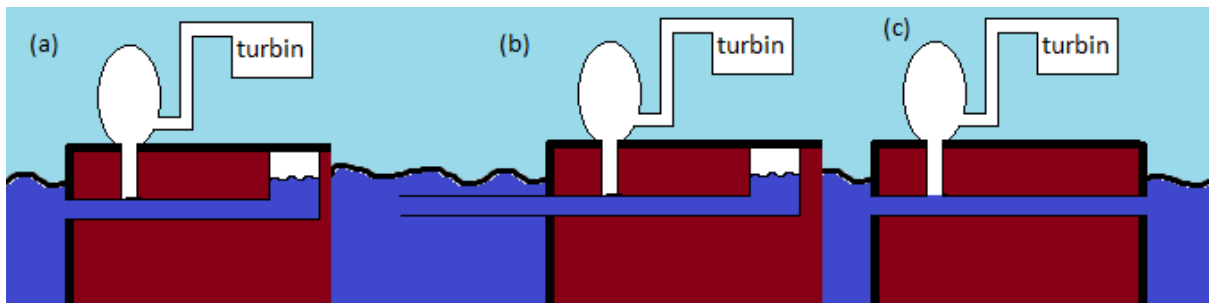
Slik figur 24 og 25 viser kan det oppstå store spenninger ved en feil på tilbakeslagsventilen. Disse spenningene økes ettersom innløpsradiusen a økes, men også når tykkelse reduseres. De virkelige spenningene vil være enda høyere enn det som er illustrert her. Dette ettersom ved en fler aksial spenningstilstand vil den totale spenningen økes ettersom det finnes spenninger i flere retninger. Denne spenningen kan unngås ved å benytte f.eks. en overtrykksventil hvis en feil oppstår.

7. Design

Denne seksjonen ser på løsningsvarianter for systemet. Dette vil si både løsningsvarianter for komponenter, men også for materialvalg og plassering av systemet. Noen av komponentene er standardkomponenter der det finnes et stort utvalg av forskjellige løsninger, og det finnes eksisterende ekspertise innenfor disse feltene. Disse standardkomponentene er trykk-tanker, sensorer og tilbakeslagsventiler. Det finnes et stort utvalg her, og ettersom ekspertise på disse komponentene finnes vil det presenteres hva som er viktig for disse komponentene, men ikke spesifikt hvilken type som burde brukes. Innløpsrøret, reservoaret og lukkemekanismen er komponenter som er mindre standardiserte og krever mer presise løsningsforslag.

7.1 Plassering

Figur 26 illustrer de forskjellige måtene systemet kan plasseres i naturen. Ved (a) og (b) vil enheten ha et basseng av vann på enden av innløpsrøret for at bølgen skal kunne få akselerere inn i innløpsrøret uten å møte en vegg og dermed stoppe akselerasjonen. Ved (c) slipper systemet å konstruere dette bassenget da innløpsrøret går ut i havet på andre siden.



Figur 26: Plassering av enheten i naturen, (a) med et rør som starter ved kysten, (b) med et rør som starter lengre ut i havet, og (c) enhet ved en molo.

Enheden kan plasseres på en måte slik at innløpsrøret har innløp ved kysten og at innløpsrøret går innover land der tanken og hydraulikksystemet sitter slik illustrert i figur 26 (a). Fordelen med denne løsningen er at komponentene som den hydrauliske akkumulatoren, utløpsrøret, hydraulikksystemet og reservoaret vil være beskyttet mot direkte påkjenninger fra bølger. Ettersom disse komponentene kan ligge mange titalls meter innover land vil ikke bølgene nå komponentene, og de vil være beskyttet mot stormer. Ulempen med en slik løsning er at konstruksjonskostnadene av et innløpsrør gravd ned i bakken, samt strukturer som må være koblet til dette røret kan bli høy. Ved nedgravde rør og strukturer kan også vedlikehold bli en utfordring ved denne plasseringen.

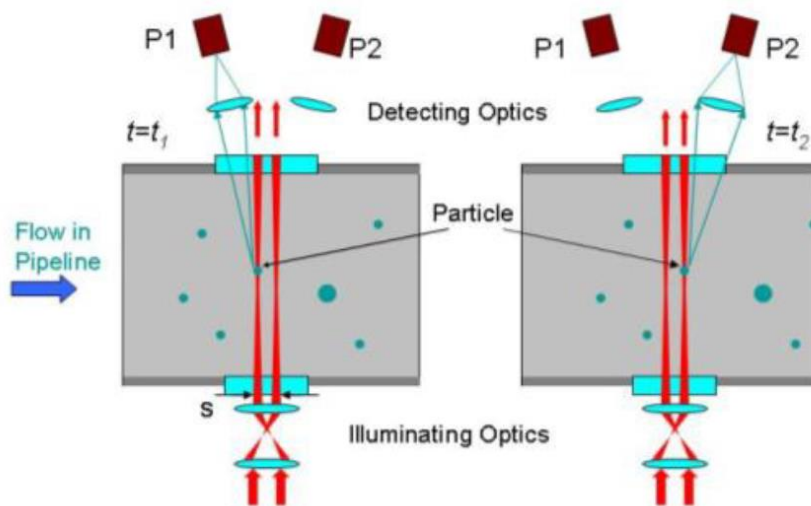
Enheden kan plasseres ved kysten slik at innløpsrøret stikker ut i havet slik illustrert i figur 26 (b). Fordelen med denne plasseringen er at installasjon av et innløpsrør og system krever mindre graving. Installasjonen krever systemer som holder innløpsrøret på plass i havet slik at det ikke beveger på seg. Installasjon og design av et slikt system kan bli komplisert. Komponentene som den hydrauliske akkumulatoren, utløpsrøret, hydraulikksystemet og reservoaret ligger ved denne løsningen nærmere havet, og bølger vil i større grad kunne påvirke komponentene.

En annen mulighet er å plassere enheten på en molo slik illustrert i figur 26 (c). Dette fører til at innløpsrøret har både et innløp og et utløp som er i direkte kontakt med havet og et reservoar på enden av innløpsrøret er dermed ikke nødvendig. Det kan være vanskelig å få plassert et reservoar og en turbin på disse områdene og kan gjøre at en slik plassering er utfordrende.

7.2 Sensorer

Det eksisterer et stort antall type sensorer som kan benyttes til å måle strømningshastigheten i vann. Det sees ikke på som hensiktsmessig å gå detaljert igjennom hvilken av disse typene som er mest egnet ettersom kunnskap rundt dette eksisterer allerede. Dette er komponenter som kan beskrives som hyllevarer og det vil være relativt lett å få valgt riktig type ved hjelp av eksisterende kunnskap i feltet. Et optiskstrømningsmeter er presentert som et eksempel på en type sensor som kan bli benyttet.

Et optiskstrømningsmeter benytter et sett med lasere som lyser igjennom strømmingen slik vist i figur 27. Når en partikkel kommer imellom senderen og mottakeren av laseren vil partikkelen bryte laseren. Dette er illustrert ved de blå partiklene i figur 27, og på denne måten vet sensoren at en partikkel har passert. Denne brytningen skjer to ganger ved to forskjellige lasere. Ved å vite avstanden mellom settet med lasere og tiden partikkelen bruker fra den første til den andre laseren kan hastigheten på strømmingen finnes [28].



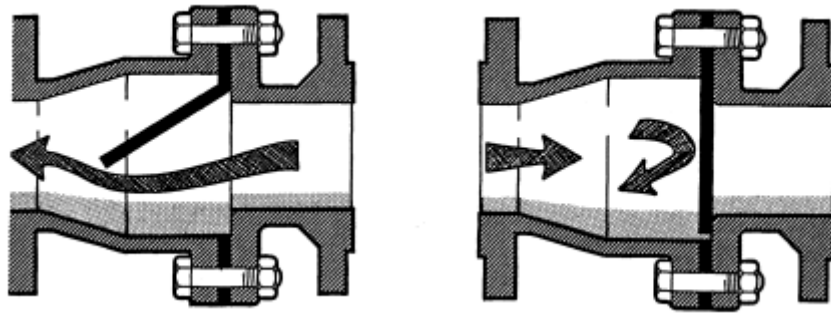
Figur 27: Optisk strømningsmåler illustrert ved en gas strømming.

Det er flere krav som stilles til en sensor. Sensoren må greie å måle hastigheten på bølgene og gi denne informasjonen over til hydraulikksystemet raskt, slik at bølgetoppen ikke passerer spjeldet før det stenges. I tillegg til dette må sensoren være relativt nøyaktig slik at den greier å finne den maksimale hastigheten pålitelig. Sensoren burde heller ikke motstå strømmingen i stor grad.

7.3 Tilbakeslagsventil

Det finnes flere forskjellige typer tilbakeslagsventiler som kan bli benyttet. Tilbakeslagsventilen i denne enheten må motstå et stort trykk, være robust og ha en høy strømningshastighet. Ventilen har et stort antall sykluser den går igjennom i løpet av livstiden sin, og det er viktig å velge en ventil som håndterer en stor mengde sykluser uten å bli ødelagt.

Figur 28 illustrer virkemåten til en svinge tilbakeslagsventil. Ved en strømming mot høyere i figur 28 vil platen bli dyttet opp av kreftene i strømmingen. Ved en strømming til venstre vil ikke platen kunne bevege seg ettersom den ikke kan svinge til høyre, men bare til venstre. Dette er en av mange forskjellige design som er mulig ved tilbakeslagsventiler. Ettersom det finnes et stort antall av tilbakeslagsventiler vil ikke disse bli nevnt nærmere da dette er kjent teknologi [29].

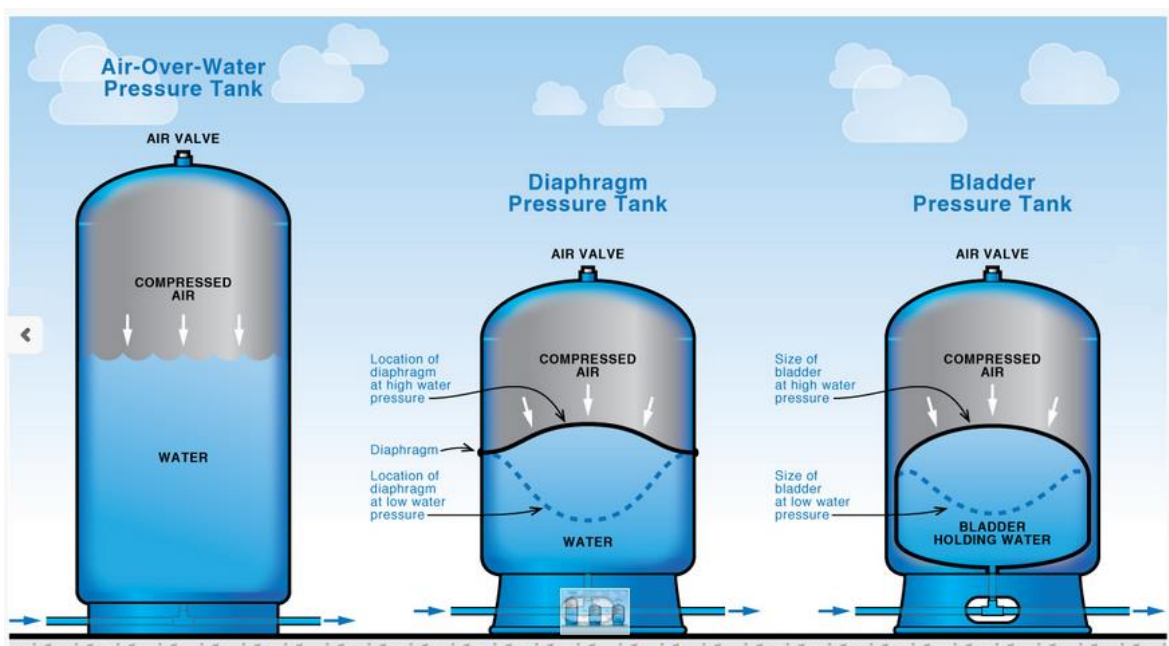


Figur 28: Illustrasjon av en svinge tilbakeslagsventil.

7.4 Hydraulisk akkumulator

Den hydrauliske akkumulatoren er delvis fylt med luft for å dempe det intense støtet fra trykkstøtet. Luften i den hydrauliske akkumulatoren blir trykket sammen når vann kommer inn og et stort trykk oppstår. Trykket som oppstår er den viktigste design parameteren ved den hydrauliske akkumulatoren da den må motstå store trykk.

Det finnes flere forskjellige typer trykktanker på markedet i dag, de tre vanligste er: luft over vann tanker, membran og blære tanker. Disse typene er illustrert i figur 29. Slik figur 29 viser er «air over water» en tank med komprimert luft som er i direkte kontakt med vann. «Diaphragm» tanken har en membran som separerer vannet og luften, men ikke veggene på tanken. En «Bladder» eller blære tank har ingen kontakt med verken luften eller beholderen rundt denne blæren.



Figur 29: Forskjellige typer trykktanker for vann [30].

7.5 Innløpsrør

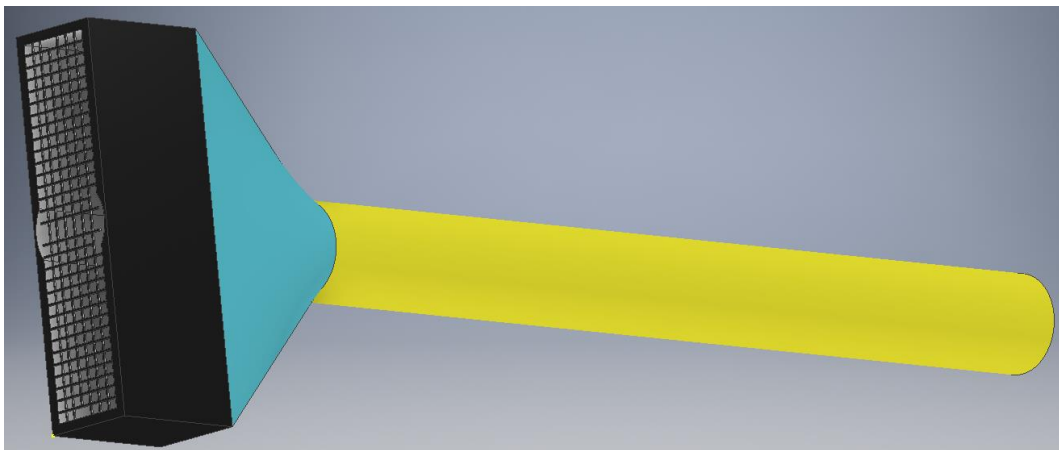
For å transportere vann fra havet inn i systemet kreves det et langt rør. Systemet må kunne motstå indre trykk og et rør er den eneste muligheten da andre former vil kollapse under et indre trykk. Den enkleste måten et innløpssystem kan konstrueres på er ved å bruke et sirkulært rør med en konstant størrelse hele veien.

Strømningshastigheten er en av de viktigste variablene for det foreslåtte bølgekraftverket, og det er viktig å maksimere hastigheten vannet treffer spjeldet med. Hastigheten kan økes ved å benytte prinsippet om masse bevarelse. Likningen for masse bevarelse er gitt ved likning 7.1.

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 \quad 7.1$$

Her er ρ tettheten til vann, A er arealet og v er hastigheten. Dette tilsier at en forandring i arealet vil føre til en forandring i hastigheten da vann ikke er komprimerbart. Ved å ha en større diameter på inngangen til røret som deretter blir innskrenket kan hastigheten bølgen treffer spjeldet med økes.

Den horisontale partikkelbevegelsen til bølgene er sterkest ved overflaten. Det er dermed viktig at innløpsrøret ikke er for langt unna overflaten. For å få en økt hastighet ved hjelp av masse bevaring er det viktig å ha en stor forandring i areal. Ettersom det er ønskelig å være nære overflaten, men også ha et stort areal er en rektangulærform ute i havgapet en mulig løsning. Denne rektangulære formen kan deretter innskrenkes til et rør. Denne type forsterker er illustrert i figur 30, der forsterkeren er den svarte og blå delen til venstre i figuren. Et gitter kan benyttes for å forhindre at fisk og andre maritime objekter ikke kommer inn i systemet.



Figur 30: Designforslag for innløpsrøret, den svarte og blå delen er forsterkeren med en grill, trykkstøtet oppstår i det gule røret.

For å beskytte rørsystemet mot stormer kan det være nødvendig å stenge innløpsrøret. Det finnes mange måter å stenge et rør på, det kan være en barriere som går foran grillen, eller en innvendig ventil i røret.

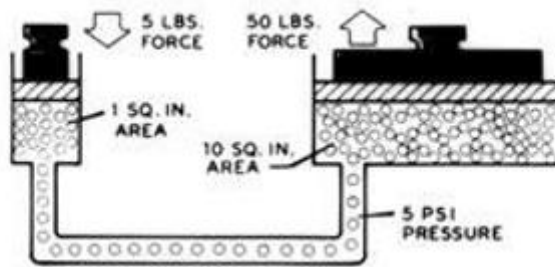
7.6 Lukkemekanismer

For at et trykkstøt skal oppstå må vannet i innløpsrøret komme til en plutselig stop. Vannet kommer til en plutselig stop ved at en barriere plasseres plutselig i strømmingen. Plasseringen av en slik barriere betegnes som en lukkemekanisme, og det finnes flere forskjellige måter en slik mekanisme kan konstrueres på. I patentsøknaden er det foreslått å benytte en hydraulisk sylindere som dytter et spjeld ned i strømmingen. Denne sylinderen får informasjon fra en sensor slik at spjeldet blir dyttet ned på det optimale tidspunktet.

7.6.1 Hydraulikkssystem og spjeld

Drivkraften bak hydraulikk kalles Pascals prinsipp, dette prinsippet sier at ettersom væsker ikke kan bli komprimert må trykket være konstant i hele væsken. Dette prinsippet er illustrert i figur 31, til venstre i figuren er en kraft på 5 LBS påført et lite område og et trykk på 5 PSI oppstår i væsken. Når dette trykket dytter mot en overflate som er ti ganger så stort som den originale overflaten vil en

kraft på 50 LBS bli produsert. En relativt liten kraft kan bli veldig stor ved å benytte dette prinsippet og er fundamentet for hydraulikksystemer [31].



Figur 31: Hydraulikk prinsipp illustrert.

Utslaget til den hydrauliske sylindere må skje raskt, og hastigheten på dette utslaget er den viktigste variabelen for et slikt lukkesystem. Sylindere må greie å lukke spjeldet innen få millisekunder for at et trykkstøt skal kunne oppstå. Dette er illustrert i seksjon 5.3 ved figur 22.

Et alternativ til en hydraulisk sylindere er en pneumatisk sylindere. Et pneumatisk system fungerer ved hjelp av trykkluft istedenfor hydrauliske væsker. En pneumatisk sylindere har en enkel struktur, lave komponent kostnader, høy sikkerhet, høy renhet, enkelt vedlikehold og er fri for magnetiske eller elektriske komponenter. Den største ulempen med en pneumatisk sylindere er at nøyaktigheten ikke er like god som f.eks. et elektrisk system. Denne nøyaktigheten er i midlertidig god nok for det foreslåtte bølgekraftverket da systemet ikke krever en millimeter presisjon for å fungere godt [32].

Utslaget til en hydraulisk sylindere og en pneumatisk sylindere fungerer på relativt like måter. Begge systemene må pumpe inn mer hydrauliske væske eller gas i systemet for å få et utslag på sylindere. Det er mye enklere å flytte store volum med gas raskt enn det er å flytte tilsvarende volum med hydrauliske væsker. Dette betyr at en pneumatisk sylindere vil være raskere enn hydraulisk sylindere på grunn av stoffet som driver sylindere.

Ettersom utslagshastigheten er den viktigste variabelen for en sylindere er en pneumatisk sylindere en bedre mulighet enn en hydraulisk sylindere. I tillegg til en høyere utslagshastighet er også en pneumatisk sylindere billigere, renere og enklere å vedlikeholde.

7.6.2 Andre muligheter.

En annen lukkemekanisme som kan benyttes er et tilsvarende system som brukes i tradisjonelle støtheverter. Lukkemekanismen i en tradisjonell støtheverte kalles en impulsventil og er illustrert i figur 32. Ventilen i figur 32 blir holdt oppe av ventilens egenvekt, men stenges når friksjonskreftene fra vannet overstiger ventilens egenvekt. Ventilen er utformet på en slik måte at friksjonskoeffisientene øker kraftig når ventilen begynner å stenge. Dette fører til at friksjonskreftene fra vannet øker tilsvarende, og ventilen lukkes svært hurtig. Friksjonskreftene er proporsjonale til hastigheten til vannet, og en økende hastighet tilsier en økende friksjonskraft.

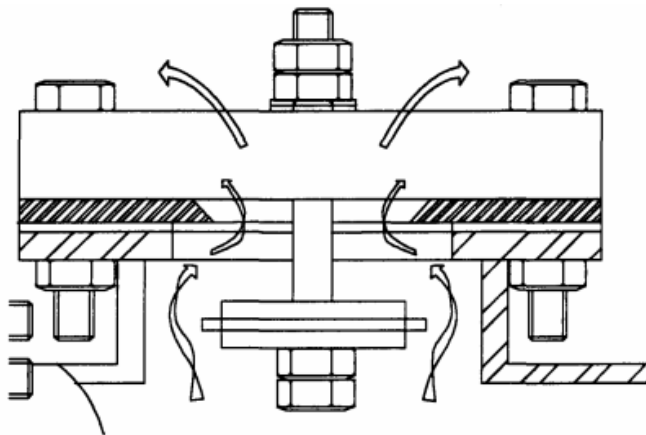
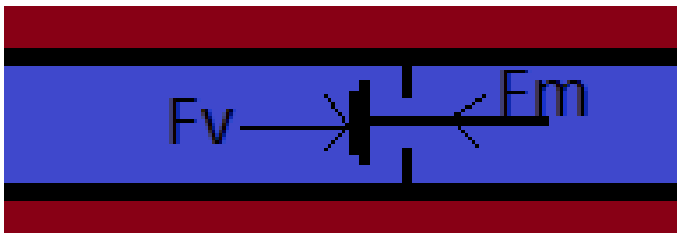


Figure 2.5 The Impulse Valve

Figur 32: Impulse valve slik benyttet i en tradisjonell støthevert [24].

Figur 33 illustrer kreftene som påvirker en impulsventil, her er F_v friksjonskraften fra vannet og F_m er motkraften som ofte er ventilens egenvekt. Når friksjonskraften F_v blir større enn motkraften F_m lukkes ventilen. I det foreslåtte bølgekraftverket må motkraften F_m være en annen kraft enn egenvekten til ventilen. F_m må kunne varieres slik at den kan motstå en varierende friksjonskraft F_v . Samtidig må F_m kunne holdes konstant på en hver størrrelse den settes på slik at ventilen lukkes når friksjonskraften når et kritisk punkt. Når ventilen lukkes må størrrelsen på F_m forbli konstant slik at ventilen lukkes raskt og ikke bremses opp av en økende kraft F_m når ventilen lukkes. Dette kunne ha vært et problem med en fjær som en motkraft F_m .

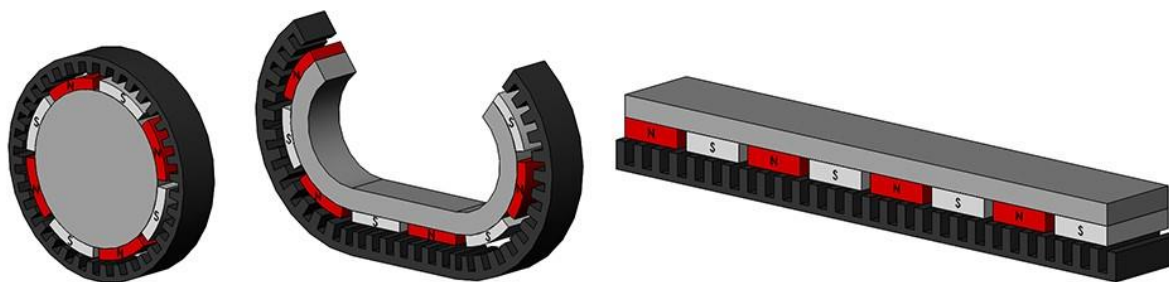


Figur 33: F_m er kraft fra motstand og F_v er friksjonskraften fra vann.

En sensor kan benyttes til å kalibere størrrelsen på F_m ettersom hastigheten på bølgene i innløpsrøret forandrer seg. Det er antatt at formen på ventilhodet vil kunne være den samme uavhengig av hvordan kraft F_m produseres slik at ventilen fungerer på samme måte som en tradisjonell støthevert.

En lineærmotor kan benyttes for å produsere denne motkraften F_m . En slik motor kan variere kraften den produserer, men også holde denne kraften konstant. Den kan holde kraften konstant både før ventilen lukkes, men også når ventilen lukkes. En lineærmotor er programmerbar og det er mulig å få den til å oppføre seg slik det er ønsket.

En lineær motor kan sees på som en elektrisk motor som har blitt delt radielt og lagt flatt utover slik illustrert i figur 34. Statoren beveger seg ikke i en slik motor, mens rotatoren settes på armen som beveger seg frem og tilbake. Kraften F_m kan justeres ved å justere mengden elektrisitet som kommer inn i statoren [33].



Figur 34: Lineær motor komponenter, det svarte på bunn av komponentene vil være statoren og den grå delen med N og S symboler er rotatoren som beveger seg.

Dette er bare en mulighet som illustrerer hvordan en slik lukkemekanisme kan konstrueres. Det er mulig at det finnes andre og bedre løsninger for en motkraft F_m enn det som er illustrert her.

7.7 Reservoar

For å mellomlagre energi kan et vannreservoar benyttes. Fra dette reservoaret går vannet ut til en turbin. Slik sett i seksjon 5 er reservoarhøyden ligger på veldig viktig for mengden med kraft systemet kan produsere. Blant annet er reservoarhøyden viktig for grensebetingelsene til systemet og det er ønskelig å komme så nære disse grensebetingelsene som mulig, men ikke over dem. Ved dette punktet fungerer systemet så godt som mulig. Reservoaret kan være statisk ved en relativt liten enhet, men ved en optimal produksjon burde reservoarhøyden kunne varieres.

Reservoarhøyden kan varieres på mange måter, men også utløpsrøret må være dynamisk for å kunne levere vann til et reservoar med en varierende høyde. En mulighet for å levere vann til forskjellige nivåer er å bruke et langt utløpsrør med en rekke hull ut til reservoarene som er styrt av ventiler. En annen mulighet er å benytte et teleskoprør for å forandre rørlengden.

Det er mulig å benytte et system slik WaveDragon gjør ved å heve og senke selve reservoaret. Energikostnader er store ved å løfte store mengder med vann, og systemet burde løfte reservoaret når det er lite vann i reservoaret. Ved å løfte reservoaret er det en risiko at kraftproduksjonen ikke øker tilstrekkelig for å gjøre opp for kraften brukt til løfteoperasjonen.

En annen mulighet for å variere reservoarhøyden er å benytte flere reservoarer på forskjellige høyder. Dette er mest relevant hvis flere enheter brukes på samme området slik at en turbin kan produsere kraft fra flere enheter. Dette er også relevant hvis energi ønskes å bli lagret i lengre tid i et reservoar. En slik løsning krever store arealer for å konstruere flere reservoarer, samt en del rør for å koble alle systemene sammen.

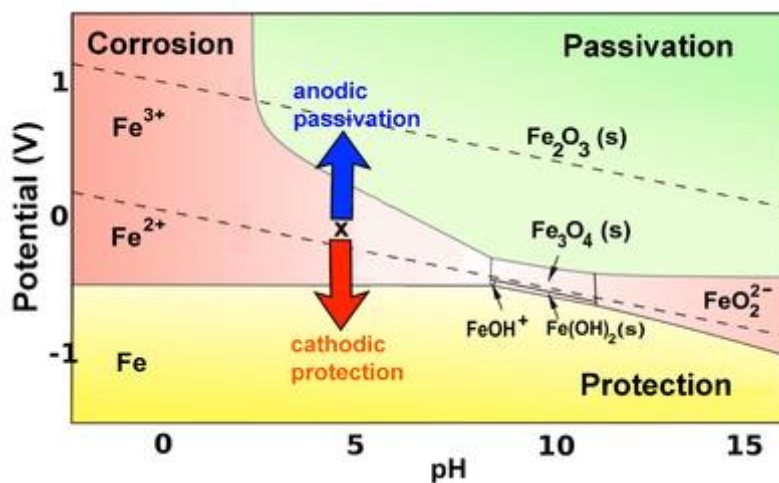
Vannspeilet i reservoaret kan varieres for å få en effektiv forskjell i reservoarhøyden. Systemet pumper vann opp i reservoaret, men benytter ikke turbinen til å få det vekk. Det som da vil skje er at høyden på vannspeilet øker, og den effektive høyden på reservoaret øker. Arealet til reservoaret kan ikke være veldig stort med denne løsningen da det vil ta lang tid å fylle et reservoar. Dette systemet er ikke egnet for energilagring i lengre tid, men bare for korte perioder for å gjøre kraftproduksjonen jevn.

7.8 Korrosjon

Korrosjon kan defineres som degraderingen av et metall ved en elektrokjemisk reaksjon med dets miljø. Degradasjon av et metall skjer når elektroner overføres mellom de involverte delene i systemet. Det er fire deler til et system som korroderer, og ved å fjerne en av de fire delene vil

korrosjon stoppe. Delen av systemet som gir fra seg elektroner kalles anoden og det er denne delen som blir borte og altså korroderer. Delen av systemet som bruker elektroner kalles katoden og vil ikke korrodere. Den tredje delen av systemet er en elektrolytt, som er en elektrisk ledende løsning, dette kan f.eks. være sjøvann. Den siste delen av systemet er en elektrisk kobling mellom anoden og katoden. Den enkleste formen for korrosjon er et metall i kontakt med en elektrolytt som f.eks. sjøvann. Metallet vil ha lokaliserte anoder og katoder på samme overflate, og ettersom et metall er elektrisk ledende er alle kriteriene for korrosjon oppfylt og metallet vil korrodere.

Metaller kan reagere på forskjellige måter i et korrosivt miljø. Det er tre hovedkategorier for hvordan metaller reagerer, immunitet der ingen korrosjon pågår, aktivitet der en form for korrosjon pågår og passivitet. Passivitet betyr at metallet korroderer og at et av korrosjonsproduktene legger seg på overflaten til metallet som et beskyttende lag. Dette beskyttende laget stopper videre korrosjon. Disse kategoriene kan finnes ved å bruke et Pourbiax diagram illustrert i figur 35, dette diagrammet viser de forskjellige kategoriene som funksjon av pH og elektrisk potensiale. I figuren er det passive området illustrert i grønt, det aktive området i rødt og det immune området i gult. Det aktive området illustrert ved rødt i figuren inneholder mange forskjellige typer korrosjon [34].



Figur 35: Pourbiax diagram, det røde området er korrosjonsområdet, det grønne området er passivitets område og det gule området er immunitetsområdet [35].

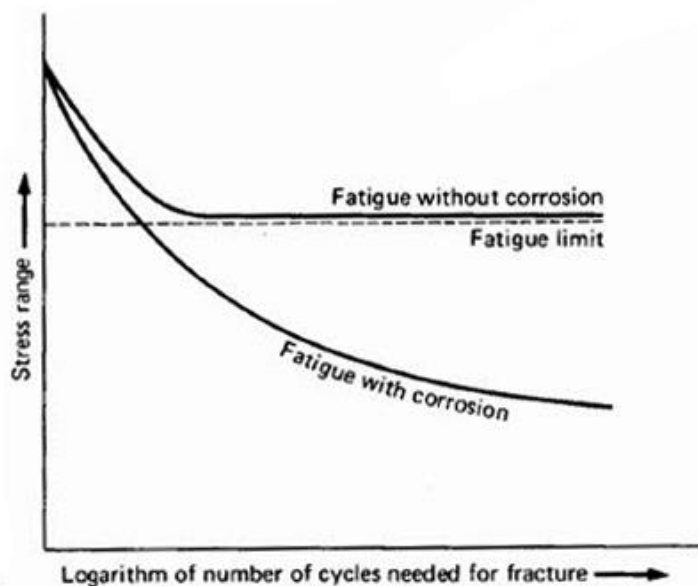
Galvanisk korrosjon er en type korrosjon som oppstår når to eller flere ulike metaller er i kontakt. Et av metallene vil da fungere som en anode, og et annet som en katode. Det edleste metallet vil fungere som katoden, og det minst edle vil fungere som anoden. Metallene må være i kontakt, og være i den samme løsningen for at galvanisk korrosjon skal finne sted. Galvanisk korrosjon unngås ved å designe komponenter slik at ulike metaller ikke er i direkte kontakt med hverandre.

Spalt korrosjon er en type korrosjon som oppstår i områder der elektrolytten sliter med å komme til. Ved områder der elektrolytten ikke har tilstrekkelig sirkulasjon vil spalt korrosjon oppstå. I disse spaltene oppstår det et lokalt miljø med mindre oksygen. Metallet som har overflater mot disse spaltene vil bli en anode, mens den resterende og potensial store metallstrukturen blir katoden. Ettersom det er en stor størrelsesforskjell mellom anoden og katoden vil anoden korrodere raskt.

Materialer som benytter et passivt lag for å beskytte mot korrosjon er utsatt for denne type korrosjon. Dette er f.eks. rustfrie stål og aluminiumslegeringer. Denne type korrosjon kan best unngås ved å unngå små spalter i de ulike komponentene. Enten ved å lage spaltene store nok til at det blir en tilstrekkelig sirkulasjon av elektrolytten, eller ved å tette spalten så godt at ingen elektrolytt kommer til.

Grop korrosjon er et lokalt korrosjons angrep som fører til små groper i metallet. Denne type korrosjon oppstår når et lite område på et ellers passivt material blir aktivt. Dette lille området blir da en anode, mens resten av materialet blir en katode. Dette fører til at lokalisert galvanisk korrosjon oppstår i dette området. Feil eller mangler på overflaten vil typisk være områder grop korrosjon starter på, og en jevn glatt overflate har en høyere motstand mot denne type korrosjon. Denne type korrosjon oppstår, eller så oppstår den ikke, og oppstår den kan være vanskelig å oppdage og kan føre til store skader.

Korrosjons utmatting er en komplisert, men viktig type korrosjon. Utmattingsbrudd skjer etter mange spenningscykluser, men dette kan skje på spenninger godt under flytegrensen. Ved en større variasjon i spenningene mellom hver syklus vil antall sykluser til brudd reduseres. Dette illustreres i figur 36 der y-aksen er spenningsbåndet, det vil si verdien spenningen pulserer mellom, og x-aksen er antall sykluser. Slik figur 36 viser vil et jernholdig metall aldri kollapse på grunn av utmatting hvis spenningsbåndet holdes under utmattingsgrensen. Dette er ikke tilfellet ved korrosjons utmatting da utmattingen sammen med det korrosive miljøet fører til et brudd tidligere og ved lavere spenningsvariasjoner. Merk at figur 36 illustrerer et tilfelle der spenningen pulserer om null [34].



Figur 36: Utmattings korrosjon, den øverste grafen er utmatting uten korrosjon, og den nederste grafen er med korrosjon [36].

I tillegg til å velge et materiale som er motstandsdyktig mot korrosjon er det flere måter å beskytte systemet mot korrosjon. De vanligste metodene er ofre anoder, ICCP og forskjellige typer overflatebehandlinger.

Ofre anoder er metallbiter som er satt på strukturen for å beskytte den. Ofre anodene tar nytte av galvanisk korrosjon og består av uedle metaller slik som sink, aluminium og mangan. Ettersom disse elementene er uedle vil de bli anoden og forsvinne på grunn av korrosjon mens systemet de er festet til er beskyttet.

ICCP eller «Impressed Cathodic Current Protection» benytter elektrisitet for å beskytte anoden. Elektrisitet er elektroner, og ved å tilføre systemet tilstrekkelig mengder med elektroner vil ikke systemet korrodere. Anoden trenger ikke å benytte elektronene sine til den elektrokjemiske reaksjonen, og elektronene fra den eksterne elektrisitetskilden blir benyttet isteden. Det behøves

derfor en kontinuerlig tilførsel av elektrisitet som er stor nok. Utfordringer ved denne metoden er at det kan være vanskelig å beregne hvor mye elektrisitet som er nødvendig for å beskytte systemet [34].

Overflatebehandlinger kommer i mange forskjellige varianter, men for dette systemet vil en type belegg være mest relevant. Dette belegg kan legges på innsiden av røret for å skille det aktive metallet fra elektrolytten og dermed stoppe korrosjon fra å oppstå. Det er to muligheter som er spesielt attraktive for det foreslåtte bølgekraftverket. Disse er et aluminiumbelegg eller et gummibelegg. Aluminium passer godt til å beskytte et system mot korrosjon da det er veldig motstandsdyktig mot sjøvann ved de riktige legeringene. Aluminium mangler derimot den nødvendige styrken til å kunne bli benyttet alene [34]. Et gummibelagt rør er en attraktiv mulighet da gummi er nærmest immun mot korrosjon [37].

7.9 Materialer

Det finnes mange forskjellige materialer som kan benyttes i konstruksjonen av enheten. De mest relevante materialene er metaller, komposittmaterialer og betong. De forskjellige materialene har forskjellige styrker og svakheter. Det mulig å benytte en kombinasjon av flere forskjellige materialer i konstruksjonen av enheten.

De mest relevante metallene for enheten er forskjellige ståltyper. Det er rustfrittstål og karbonstål som er de mest relevante typene for dette systemet. Karbonstål er et relativt billig materiale med en høy styrke, men dårlig korrosjonsmotstand. Rustfrie stål er dyrere, men er sterke og har god korrosjonsmotstand. Det finnes andre typer metaller som kan benyttes, men disse har en lav styrke eller er betydelig dyrere enn stål.

Betong har en utmerket korrosjonsmotstand og egner seg derfor i et marint miljø. Det er problematisk å benytte betong i strekk, da det kan oppstå sprekker, som igjen kan føre til at vann kommer inn i betongen som kan korrodere ubeskyttet stål [38].

Ettersom det vil oppstå store strekkspenninger i innløpsrøret er det ikke optimalt å benytte betong her, men betong kan benyttes til å konstruere forsterkeren. Spenningen i forsterkeren oppstår på grunn av bølgene, og ikke et indre trykk. Det er dermed mulig å benytte en betongstruktur på forsterkeren, som kan kobles til innløpsrøret som er laget av et annet materiale [39].

FRP eller «Fibre Reinforced Plastics» er en type kompositt materiale som er motstandsdyktig mot sjøvannsbasert korrosjon og de fleste jord miljøer. Det er dokumentert at FRP rør har vært funksjonelle i 22 år uten noen problemer, og materialet har dermed en lang levetid [40].

FRP kompositter består av to deler, fiber og en matrise. Fibrene utgjør omtrent 30 – 70 % av volumet til et kompositt og omtrent halvparten av vekten. Fibrene bærer lastene, gir stivhet og andre mekaniske egenskaper til kompositten. Matrisen holder fibrene på plass, fordeler lasten til fibrene i matrisen og beskytter fibrene. Matrisen beskytter fibrene både mot skade ved produksjon og generell bruk, men også mot miljøet.

Det er tre fibertyper som utgjør størstedelen FRP materialer som er brukt i dag, disse er: karbonfiber, glassfiber og aramid. Av disse typene er karbonfiber det dyreste og er omtrent 10 – 30 ganger dyrere enn glassfibere, og av denne grunn burde ikke karbonfibre benyttes. Aramid fibre er ikke veldig motstandsdyktige mot fuktighet og kan derfor ikke brukes til et rør i havet. Glassfibere er den mest brukte fiberen i FRP kompositter og er de billigste fibrene. Glassfibere er fiberen som burde brukes hvis et kompositt materialet skal benyttes [41].

Det finnes mange typer glassfibere, og noen av disse er motstandsdyktige mot korrosjon mens andre typer er veldig utsatt for korrosjon. I FRP kompositter benyttes det et lag med mye resin og glassfibere som er motstandsdyktige mot korrosjon som et ytre lag for å beskytte de strukturelle fibrene i senteret av materialet. Motstandsdyktigheten mot korrosjon i FRP kompositter er avhengig av dette beskyttende laget.

Glassfiber kompositter kan ha problemer med ESCC eller «Environmental stress corrosion cracking». Dette er synonymt med det som skjer for metaller, og komposittene kan kollapse godt under flytegrensen. Brudd oppstår tidligere ettersom spenningen, temperaturen og surheten på miljøet øker. Dette vil ikke nødvendigvis være et problem i sjøvann ved lave temperaturer, men det er viktig å være klar over at dette eksisterer hvis denne type material skal brukes [42].

Kostnadmessig er betong det billigste konstruksjonsmaterialet som er tilgjengelig, og det er fornuftig å bruke dette materialet der det er hensiktsmessig. Både glassfiber kompositter og rustfrie stål har egenskaper av interesse, men de kommer ved en relativt høy kostnad. Vanlig karbon stål er betydelig billigere enn disse mulighetene, men krever en tilleggs kostnad ved f.eks. overflatebehandlinger for å beskytte mot korrosjon [43]. En kombinasjon av betong og karbonstål sees på som de beste materialene enheten kan konstrueres med. Dette er i stor grad ettersom kostnadene er lavere enn andre materialer og materialene oppfyller satte krav.

8. Diskusjon

For at et bølgekraftverk skal være lønnsomt er det viktig å fokusere på kostnadene knyttet til systemet. Et fokus på kostnad er viktig for at systemet kan bli kommersielt suksessfullt. Kostnader knyttet til produksjon, installasjon, drift og vedlikehold av systemet er de viktigste undergruppene av kostnader i det foreslåtte bølgekraftverket. Noen av disse kostnadene kan reduseres ved å velge gode komponenter, eller ved å designe systemet på en optimal måte.

Vedlikehold og drift er en viktig del av designet til enheten. Forskjellige løsningsvarianter og komponenter har en lavere kostnad for kontinuerlig drift eller et enklere vedlikehold i forhold til andre løsninger. Ved et endelig valg av komponenter og løsningsvarianter er dette viktige kriterier.

Konstruksjonen av enheten har en stor påvirkning på kostnaden til systemet. Dette gjelder både produksjonen av de individuelle komponentene, men også installasjonen av systemet i naturen. Sammenkoblingen av de forskjellige komponentene er en utfordring som må undersøkes. Installasjonen av enheten i naturen krever store arealer som må bearbeides for å få installert de forskjellige komponentene i systemet. Innløpsrøret vil f.eks. være plassert under bakken under havnivået, og mye graving kan behøves for å plassere røret. Resten av systemet kan også være utfordrende å installere innenfor en akseptabel kostnadsramme.

Reservoarhøyden z_3 er variabelen som burde benyttes for å kontrollere grenseverdiene, og dermed også kraftproduksjonen som en helhet. Dette betyr i praksis at plasseringen av enheten i naturen er en av de viktigste indikatorene på hvor mye kraft et slikt system kan produsere. Ved plassering på flate områder vil det kreves store strukturer for å bygge et tilstrekkelig høyt reservoar. Ved en plassering i høyere terreng er det lettere å bygge reservoarer som har en stor høyde, men kostnadene med å installere resten av systemet kan øke. Dette ettersom mye graving da vil være nødvendig for å plassere enheten under havnivå.

Innløpsdiameteren D_1 har en stor innflytelse på hvor mye kraft systemet kan produsere. En liten økning av denne diameteren betyr en enorm økning i kraft som er mulig å produsere. Tabell 3 illustrer hvordan diameteren på innløpsrøret forandrer P_{max} , ved en lengde $L_1 = 20$ m og $z_3 = 10$ m. På bakgrunn av dette vil det være av stor interesse i å øke denne diameteren for å øke en av grenseverdiene betraktelig. Konstruksjonskostnaden ved å installere innløpsrøret burde være langt høyere enn en økning av materialkostnadene ved en høyere diameter.

Tabell 3: Innløpsdiameter D_1 mot kraft produsert ved små diametere

D_1 [m]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
P_{max} [kW]	13	55	125	222	347	499	679	887	1123	1386

Innløpsdiameteren setter også begrensninger på hvilken type lukkemekanismer som kan benyttes. Ved en stor diameter må en pneumatisk sylindere bevege seg med en stor hastighet for å lukke spjeldet raskt nok for å produsere et trykkstøt. Det kan være vanskelig å finne pneumatiske eller andre typer sylindere som kan bevege spjeldet med tilstrekkelig hastighet for å produsere et trykkstøt når D_1 blir stor. Innløpslengden L_1 bestemmer også hvor fort et spjeld må bevege seg, og en tilsvarende innløpsdiameter D_1 må velges. En stor innløpsdiameter D_1 er ikke et problem med den foreslåtte mekanismen om å benytte en mer tradisjonell lukkemekanisme. Den tradisjonelle lukkemekanismen burde benyttes hvis innløpsrørets diameter blir stor.

Innløpsrøret kan øke innløpshastigheten v ved å redusere arealet slik illustrert i seksjon 7.5, men dette vil ikke alltid være nødvendig. En enhet som er designet for en lavere kraftproduksjon, med tilhørende z_3 og L_1 verdier vil ikke trenge en høy innløpshastighet v for å treffe grenseverdiene. En økning i innløpshastigheten er dermed meningsløs, og et komplisert innløpsrør er bortkastede penger.

Erosjon er ikke nødvendigvis et problem, men det kan bli et problem basert på plasseringen av enheten. Plasseres enheten ved områder der det f.eks. er mye sand på havbunnen nær innløpsrøret øker sannsynligheten for at erosjonsproblemer oppstår. Problemer som oppstår fra sand partikler vil ikke bare være erosjon, men også at sand partikler kan sette seg fast i systemet og f.eks. hindre funksjonaliteten til tilbakeslagsventilen. Dette kan igjen føre til at systemet krever mer vedlikehold for å fungere optimalt.

Utmatting av komponenter er en stor utfordring i et hvert mekanisk system for å få en lang livstid. Utmatting reduseres når kreftene reduseres, men da reduseres også kraft produsert. Utmatting løses ved dimensjonering, design og valg av materialer.

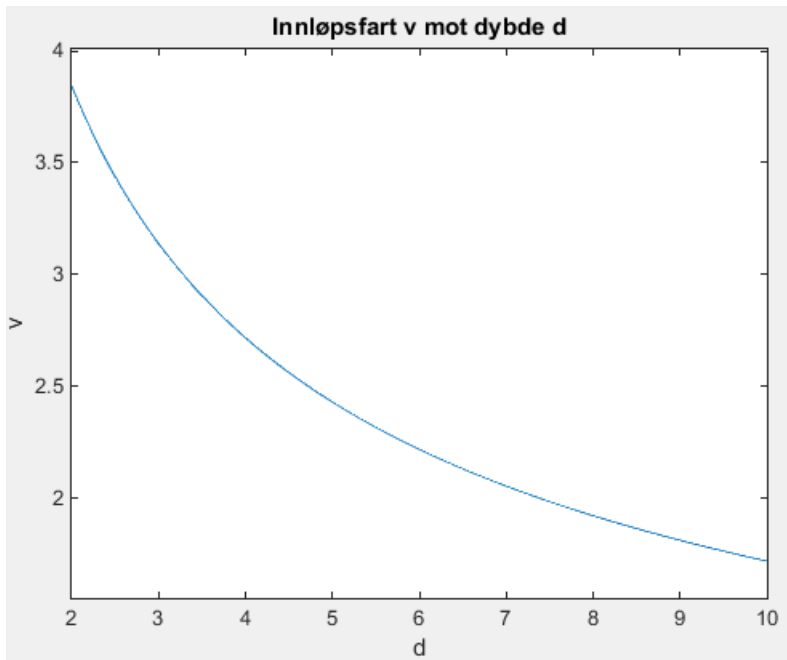
Stormbeskyttelse av systemet gjøres på forskjellige måter variert med type lukkemekanisme som benyttes. Ved en lukkemekanisme basert på en pneumatisk sylinder og et spjeld kan kanalen være åpen under en storm, men spjeldet holdes oppe. Slik produseres ikke et trykkstøt, og det er bare kanalen og innløpsrøret som må motstå kreftene fra bølgene.

En annen mulighet for å beskytte systemet mot stormer er å plassere en barriere foran forsterkeren eller en ventil i innløpsrøret før lukkemekanismen. Dette hindrer stormen i å komme frem til lukkemekanismen, og kreftene fra bølgene blir påført på en av disse barrierene. Denne type beskyttelse burde benyttes ved en tradisjonell lukkemekanisme, da lukkemekanismen ikke kan komme seg unna de store kreftene i en storm.

Monsterbølger er et potensielt problem med bølgekraftverk og en måte for å takle disse bølgene må beskrives. En monsterbølge vil si en bølge som er større og mer energirik enn de omliggende bølgene som kan oppstå plutselig. Disse monsterbølgene fører til en større hastighet og last fra bølgene på strukturen. Med en tradisjonell lukkemekanisme vil hastigheten ventilen lukkes ved være mye lavere enn den maksimale hastigheten og ingen skade vil inntreffe på systemet. Ved et spjeld basert lukkesystem kan det være åpent mens bølgene passerer inn i innløpsrøret uten å lukke spjeldet.

Konsekvensene av feil i systemet er ikke beskrevet i seksjon 7, men dette er noe som må undersøkes før et kraftverk kan konstrueres. Et eksempel på dette kan være at tilbakeslagsventilen ikke åpnes, og det store trykket slik produsert av trykkstøtet forblir i innløpsrøret. Dette vil føre til at røret kollapser, og kan føre til store skader. Innløpsrøret kan dermed designes med et svakt punkt, slik at røret vil kollapse på en kontrollert måte for å redusere skadene hvis en slik feil skulle oppstå. Konsekvenser av forskjellige feil som kan oppstå i systemet må undersøkes.

Det er gjort antagelser for å beskrive systemet. En av disse antagelsene er at den horisontale partikkelbevegelsen produsert av bølgene produserer en konstant hastighet i innløpsrøret. Dette vil si at hastighets variasjon av denne horisontalbevegelsen som funksjon av avstand fra overflaten til havet ikke er tatt med i beregningene. Dette vil si at ved en stor innløpsdiameter kan dette være en feilkilde da bølgene ikke akselerer like mye som modellen tilsier. Denne hastighetsvariasjonen er illustrert i figur 37, og illustrer viktigheten av å plassere kraftverket ved et grunt område.



Figur 37: Innløpshastighet v som funksjon av dybde d .

Miljøfaktorer som det marine biologiske miljøet er ikke diskutert i denne oppgaven. Det er likevel noe som må undersøkes før en enhet kan plasseres i naturen. Det er uønsket at en enhet produserer negative effekter i miljøet den plasseres i. Spørsmål slik som påvirkningen lekkasjer fra et hydraulisk system har på miljøet må vurderes.

9. Konklusjon

Bølgekraftverket slik foreslått av Karl Venås i patentsøknaden har potensiale til å produsere kraft. Fordelene med det foreslåtte kraftverket er det løser mange av utfordringene som kobles til bølgekraft uten kompliserte mekanismer. De eneste bevegelige delen i systemet vil være ventiler som kontrollerer strømmingen.

Den store utfordringen med dette systemet er at det kan være utfordrende å konstruere et kraftverk innenfor akseptable kostnader. Det kan være vanskelig å finne en lokasjon som gjør det lett å installere innløpsrøret, en hydraulisk akkumulator og en lukkemekanisme ved havnivå samtidig som et reservoar kan konstrueres uten store kostnader. Å finne en slik lokasjon er viktig for at et slikt bølgekraftverk kan bli konstruert innenfor akseptable kostnader.

Bølgekraftverket slik foreslått fungerer på et prinsipielt nivå, men det er fortsatt mye arbeid som gjenstår før et anlegg kan bygges. En mer detaljert utredning av de forskjellige løsningsvariantene som er presenter må gjøres. Valg av standard komponentene må gjøres og disse må kobles sammen med resten av systemet. Flere analyser om blant annet spenninger, utmatting og liknende må gjøres.

Videre utfordringer før et slikt bølgekraftverk kan realiseres vil være å få kostnadene så langt ned som mulig, og da spesielt konstruksjonskostnadene. Hvis disse kostnadene er lave nok er det god grunn til å tro at et slikt anlegg kan produsere mye kraft uten å bli ødelagt av stormer. Det kan være veldig interessant og fruktbart å se videre på dette konseptet for en bølgeenergi konverterings mekanisme.

10. Referanser

1. Pecher, A. & Kofoed, J. (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy*. Cham: Springer, pp.203 – 220. Tilgjengelig ved: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-39889-1_8 [Besøkt 9 Juni. 2018].
2. Krogstad, H. & Arntsen, Ø. (2000). *LINEAR WAVE THEORY PART A Regular Waves*. [pdf] Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Tilgjengelig ved: http://folk.ntnu.no/oivarn/hercules_ntnu/LWTcourse/lwt_new_2000_Part_A.pdf [Besøkt 10 Juni. 2018].
3. Krogstad, H. & Arntsen, Ø. (2000). *LINEAR WAVE THEORY PART B Random waves and wave statistics*. [pdf] Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Tilgjengelig ved: http://folk.ntnu.no/oivarn/hercules_ntnu/LWTcourse/lwt_ran_2000_part_b.pdf [Besøkt 10 Juni. 2018].
4. Clémet, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M., Schild, P., Sjöström, B., Sørensen, H & Thorpe, T. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] Volume 6(5). Tilgjengelig ved: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032102000096> [Besøkt 10 Juni. 2018].
5. Cruz, J. (2008). *Ocean Wave Energy*. Berlin: Springer.
6. López, I., Andreu, J., Ceballos, S., de Algería, I & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] Volume 27. Tilgjengelig ved: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004541> [Besøkt 10 Juni. 2018].
7. Emec.org.uk, (2018). *WAVE DEVICES*. [online] Tilgjengelig ved: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/> [Besøkt 10 Juni. 2018].
8. Emec.org.uk, (2018). *PELAMIS WAVE POWER*. [online] Tilgjengelig ved: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/> [Besøkt 10 Juni. 2018].
9. Wavedragon.co.uk, (2017). *Wave Dragon*. [online] Tilgjengelig ved: <http://www.wavedragon.co.uk/technology-2/> [Besøkt 11 Juni. 2018].
10. Tedd, J & Kofoed, J. (2009). Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon, wave energy converter. *Renewable Energy*, [online] Volume 34(3). Tilgjengelig ved: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014810800195X> [Besøkt 11 Juni. 2018].
11. Stensvold, T. (2017). Norge har fått sitt første bølgekraftverk som leverer strøm til kraftnettet. Slik virker det. *Teknisk Ukeblad*, [online]. Tilgjengelig ved: <https://www.tu.no/artikler/norge-har-fatt-sitt-forste-bolgekraftverk-som-leverer-strom-til-kraftnettet-slik-virker-det/395569> [Besøkt 11 Juni. 2018].
12. Waves4power.com, (2018). *waves4power*. [online] Tilgjengelig ved: <https://www.waves4power.com/> [Besøkt 11 Juni. 2018].

13. Waves4Power (2015). *Coriolis AB participates in the design-team for Wave energy converter*. [bilde]. Tilgjengelig ved: <http://coriolis.se/home> [Besøkt 11 Juni. 2018].
14. Waves4power.com. *TIMELINE*. [online] Tilgjengelig ved: <https://www.waves4power.com/demo-runde/> [Besøkt 11 Juni. 2018].
15. SEED. *Oscillating Water Column (OWC)*. [bilde] tilgjengelig ved: <http://learning.media.mit.edu/seed/wave%20energy.html> [Besøkt 12 Juni. 2018].
16. Salimullah, S. (2017). *Archimedes Wave Swing*. [bilde] Tilgjengelig ved: https://www.researchgate.net/figure/Archimedes-Wave-Swing2_fig1_317718471 [Besøkt 11 Juni. 2018].
17. Emec.org.uk, (2018). *WELLO OY*. [online] Tilgjengelig ved: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/wello-oy/> [Besøkt 11 Juni. 2018].
18. wello.eu, (2018). *INNOVATIVE*. [bilde] tilgjengelig ved: <https://wello.eu/> [Besøkt 12 Juni. 2018].
- 19./20 <http://aw-energy.com/about-waveroller/waveroller-concept>
20. aw.energy.com, (2018). *Waveroller*. [online] Tilgjengelig ved: <http://aw-energy.com/waveroller/> [Besøkt 12 Juni. 2018].
21. Muetze, A. & Vining, J. (2014). Ocean Wave Energy Conversion – A Survey. In: *IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. [online]. Tilgjengelig ved: https://www.researchgate.net/profile/A_Muetze/publication/224676567_Ocean_Wave_Energy_Conversion_-_A_Survey/links/00b7d51a65a42b45f6000000.pdf [Besøkt 11 Juni. 2018].
22. snl.no, (2009). *støtthevert*. [online] Tilgjengelig ved: <https://snl.no/st%C3%B8tthevert> [Besøkt 11 Juni. 2018].
23. Basfeld, M. & Müller, E. (1984). The hydraulic ram. *Forschung im Ingenieurwesen A*, [online] Volume 50(5). Tilgjengelig ved: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02560600> [Besøkt 11 Juni. 2018].
24. Glover, B. (1994). *Computer Simulation and Analysis Methods in the Development of the Hydraulic Ram Pump*. [online] PhD. University of Warwick. Tilgjengelig ved http://wrap.warwick.ac.uk/66359/1/WRAP_THESIS_Glover_1994.pdf [Besøkt 11 Juni. 2018].
25. Ghidaoui, M., Zhao, M., McInnis, D. & Axworthy, D. (2005). A Review of Water Hammer Theory and Practice. *Applied Mechanics Review*, [online] Volume (58). Tilgjengelig ved: http://hydraulics.unibs.it/hydraulics/wp-content/uploads/2012/04/A_review_of_water_hammer_theory_and_practice.pdf [Besøkt 11 Juni. 2018].
26. Brekke, H. (2001). *HYDRAULIC TURBINES Design, Erection and Operation*. [online] Tilgjengelig ved: https://www.ntnu.no/documents/381182060/1267681377/HYDRAULIC+TURBINES_Hermod+Brekke+-+2015.pdf/656e691a-f52f-4c0d-a6b1-eaf069c08ef5 [Besøkt 11 Juni. 2018].
27. Cengel, Y., Cimbala, J. & Turner, R. (2013). *FUNDAMENTALS OF Thermal-Fluid Sciences*. 4th ed. New York: McGraw-Hill.
28. Hailey, D. (2015). *Optical Flow Measurement*. [online] Tilgjengelig ved: http://cosaxentaur.com/resources/article_level1/916/Flare_Gas_Flow_Measurement_NTMA_Apr-2015.pdf [Besøkt 11 Juni. 2018].

29. Smith, P. (2012). *The Function of Check Valves Used in the Oil & Gas Industry*. [online] Tilgjengelig ved: <https://pdhonline.com/courses/m163/SMITHCH04%20-153%20to%20168.pdf> [Besøkt 11 Juni. 2018].
30. HEDMAN (2017). *Pressure Tank Styles*. [bilde]. Tilgjengelig ved: <http://www.hedmandrilling.com/blog/pressure-tank-styles/> [Besøkt 11 Juni. 2018].
31. crossmfg.com (2018). *Basic Hydraulic Theory*. [online] Tilgjengelig ved: <https://crossmfg.com/resources/technical-and-terminology/basic-hydraulic-theory> [Besøkt 12 Juni. 2018].
32. Sato, K. & Sano, Y. (2014). Practical and intuitive controller design method for precision positioning of a pneumatic cylinder actuator stage. *Precision Engineering*, [online] Volume 38(4). Tilgjengelig ved: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635914000506> [Besøkt 11 Juni. 2018].
33. Hinds, A. (2016). *The Linear Motor: How Does It Work?*. [online] Tilgjengelig ved: <https://www.automation.com/automation-news/article/the-linear-motor-how-does-it-work> [Besøkt 11 Juni. 2018].
34. Trethewey, K. & Chamberlain, J. (2001). *Corrosion for Science and Engineering*. 2nd ed. Harlow: Addison Wesley Longman Limited.
35. Chemistry Libre Texts (2015). *Corrosion and Passivation*. [bilde] Tilgjengelig ved: [https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Inorganic_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Inorganic_Chemistry_\(Wikibook\)/Chapter_04%3A_Redox_Stability_and_Redox_Reactions/4.5%3A_Pourbaix_diagrams](https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Inorganic_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Inorganic_Chemistry_(Wikibook)/Chapter_04%3A_Redox_Stability_and_Redox_Reactions/4.5%3A_Pourbaix_diagrams) [Besøkt 12 Juni. 2018].
36. Total Materia (2015). *Corrosion Fatigue*. [bilde] Tilgjengelig ved: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=EN&NM=441> [Besøkt 12 Juni. 2018].
37. Rezaeian, I., Zahedi, P. & Loghmani, M. (2009). Formulation and curing characteristics of EPDM/NR and EPDM/SBR polyblends used in metallic surfaces rubber lining. *Journal of Applied Polymer Science*, [online] Volume 113(2). Tilgjengelig ved: https://www.researchgate.net/publication/230228553_Formulation_and_curing_characteristics_of_EPDMNR_and_EPDMsBR_polyblends_used_In_metallic_surfaces_rubber_lining?enrichId=rgreq-3743725b42833652f81cfcb5cef54907-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIzMDIyODU1MztBUzo2MTEzODU4MjYzNjk1MzZAMTUyMjc3NzE0ODY0MA%3D%3D&el=1_x_2&esc=publicationCoverPdf [Besøkt 12 Juni. 2018].
38. Fernández, R. & Pardo, M. (2013). Offshore concrete structures. *Ocean Engineering*, [online] Volume 58. Tilgjengelig ved: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801812003952> [Besøkt 12 Juni. 2018].
- 39/38. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801812003952>
40. Bogner, B. & Curry, B. (2008). FRP pipe meets power plant requirements. *Reinforced Plastics*, [online] Volume 52(4). Tilgjengelig ved: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034361708701036> [Besøkt 12 Juni. 2018].

41. Sonnenschein, R., Gajdosova, K. & Holly, I. (2016). FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges. *Procedia Engineering*, [online] Volume 161. Tilgjengelig ved: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816328946> [Besøkt 12 Juni. 2018].
42. Myers, T., Kytomaa, H. & Smith, T. (2007). Environmental stress-corrosion cracking of fiberglass: Lessons learned from failures in the chemical industry. *Journal of Hazardous Materials*, [online] Volume 142(3). Tilgjengelig ved: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406007552> [Besøkt 12 Juni. 2018].
43. materials.eng.cam.ac.uk. *Strength – Cost*. [online] tilgjengelig ved: http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/strength-cost/basic.html [Besøkt 12 Juni. 2018].

Vedlegg

Vedlegg A: Patentsøknad utgangspunkt.

Søker: Karl Venås
Hamangskogen 73
1338 Sandvika

Oppfinner: Søkeren

Oppfinnelsens benevnelse: Energikonverter

Bakgrunn

Omforming av bølgeenergi, til f eks elektrisk energi, er en miljøvennlig prosess som kommer under begrepet fornybar energi. Ved konverteringen er det ikke noe utslipp av miljøskadelige

stoffer som CO₂(g). Å komme fram til gode løsninger er meget viktig og det er uttrykt en omfattende interesse for konvertering av bølgekraft. Litteraturen beskriver et stort antall forslag på bølgekraftverk, men per i dag er det få løsninger som kan betraktes som økonomisk lønnsomme. Foreliggende oppfinnelse vedrører en anordning for å omforme bølgeenergi til mekanisk eller elektrisk energi er angitt i patentkrav 1. Oppfinnelsen videreutvikler prinsippet for en støthevert, som er oppfunnet i 1796 av franskmannen Joseph Michel Montgolie. Foreliggende oppfinnelse dreier seg om et system som regulerer en støthevert som konverterer bølgeenergi til trykkenergi.

Detaljert beskrivelse av oppfinnelsen

Prinsippet framgår av etterfølgende figurer, figur 1 illustrerer at vann fra en bølge kommer inn kanalen (1) og går inn i en beholder (2) ved hjelp av reguleringsenheter. Når en bølge kommer inn fra venstre inn i kanalen (1) løftes flottøren (10) opp samtidig som utløpet av kanalen (1) stenges av et spjeld (3). Flottøren (10) er monter til en vektstang (9) i den ene ende og et spjeld i den andre enden av vektstangen som er opplagret i (13), dvs. når flottøren (10) går opp tvinges spjeldet (3) ned og stenger kanalen (1). Spjeldet (3) går ned i en styrespalten (14). Se figur 1 og figur 5 som viser posisjonen ved stengt kanal. Slissen (11) lages for unngå at vektstangen kiler seg fast. Når spjeldet (3) er nede oppstår et støt som bevirker en trykkøkning i bølgen, ventilen (5) åpnes og vann strømmer gjennom åpningen (6) inn i beholderen (2). Når trykket avtar i kanalen vil ventilen (5) stenge åpningen (6). Vannet i beholderen (2) går ut gjennom et rør (4) til en turbin eller et høyereliggende reservoar. Røret (4) er tilknyttet en tilbakeslagventil som forhindrer vannretur gjennom røret (4) inn i beholderen (2). Vektarmen (9) går slik at spjeldet (3) åpner kanalen igjen og ventilen (5) lukkes. Dette gjentas for hver store bølge som kommer. Mekanismen for å åpne og stenge ventilen (5) er en aksling (7) som er forbundet med ventilen (5) i den ene ende og en veiv (8) i den andre. Akslingen (7) går gjennom veggen på beholderen (2), hvor en pakkboks tetter rundt akslingen (7). Veiven (8) er tilknyttet en slisse på vektarmen (9). Et annet alternativ til spjeldets åpningsmekanisme er vist på figur 6. Her tenkes at spjeldet åpnes og stenges vha av en hydraulisk sylinder (13). En trykkmåler (15) kan benyttes for å styre den hydraulisk sylinder som også kan programmeres og styres f eks vha en bølgeregistrator. Den hydraulisk sylinder kan også være til hjelp for å redusere tiden for å stenge og åpne henholdsvis spjeld (3) og ventil (5).

Kort beskrivelse av tegningene

Oppfinnelsen skal i det følgende beskrives nærmere under henvisning til de medfølgende tegningene, der:

Figur 1 viser skjematisk et oppriss sett fra siden av oppfinnelsen, spjeldet er i lukket posisjon.

Figur 2 viser skjematisk figur 1 dreid 90 grader mot venstre.

Figur 3 viser gjenstanden sett ovenfra med snitt A-A , se figur 1.

Figur 4 viser skjematisk et oppriss sett fra siden av oppfinnelsen, spjeldet er i åpen posisjon.

Figur 5 viser skjematisk et oppriss sett fra siden av oppfinnelsen, spjeldet er i lukket ventilen åpen. Viser også luftrommet som befinner seg over vannspeilet ved full beholder.

Figur 6 viser skjematisk et oppriss sett fra siden av oppfinnelsen, spjeldet er i lukket og ventilen åpen. I tillegg er inntegnet hydraulisk sylinder som styres fra en trykksonde. Viser også luftrommet som befinner seg over vannspeilet ved fullreduert vannmengde i beholder.

Patentkrav

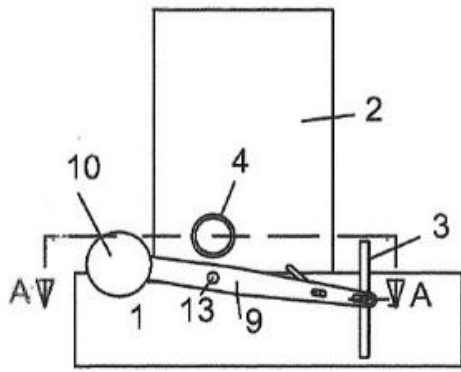
Krav 1. Anordning for å omforme bølgeenergi til mekanisk eller elektrisk energi, hvor prinsippet for oppfinnelsen er en anordning som konverterer kinetisk bølgeenergi fra havbølger til potensiell trykenerg, dette gjøres ved at bølger ledes inn i et rektangulært eller sirkulært kanal (1), hvor kanalen (1) er utrustet med en lukkeanordning, et spjeld, (3) som raskt kan stenge hele kanal tverrsnittet, og dette bevirker at den kinetiske energien går over til trykenerg hvor trykkøkningen bevirker åpning av tilbakeslagsventilen (5) åpner seg og leder vannet inn i en beholder (2) som fylles og vannet presses ut via en rør (4) hvor en tilbakeslagsventil er montert, når trykket i kanalen (1) er lavere enn trykket i beholderen (2) lukkes ventilen (5), kanalen er da helt åpen og en ny bølge kan komme inn, prosedyren gjentas kontinuerlig og overfører vannet til en turbin som driver en generator for produksjon av elektrisk energi.

Krav 2. Anordning ifølge krav 1 der kanalen (1) kan lukkes og åpnes ved hjelp av vha to opplagrete vektstenger (9) som i den ene ende er knyttet til et spjeld (3) og den andre knyttet til en flottør (10), pga oppdriften fra bølgen, som er på vei inn i kanalen, vil flottøren (10) løftes opp, og spjeldet (3) gå ned og stenger kanal tverrsnittet og en bunnventil (5) åpnes slik at vann strømmer inn i beholderen (2).

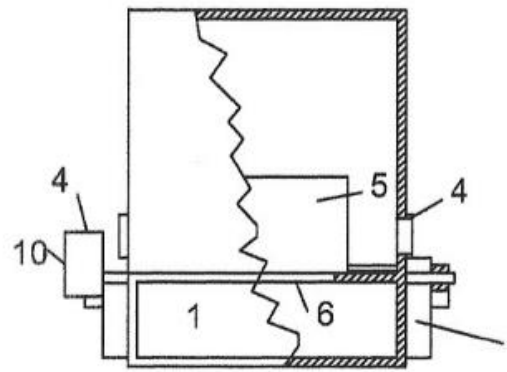
Krav 3. Anordning ifølge krav 1 der kanalen (1) og ventilen (5) kan åpnes og stenges vha en hydraulisk sylinder (13)

Sammendrag

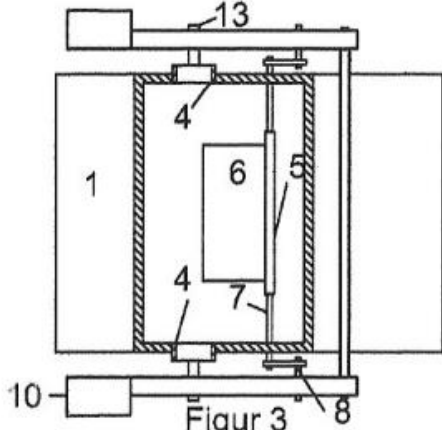
Prinsippet framgår av figur 1, hvor en bølge kommer inn fra venstre mot flottøren (10) som løftes opp og bølgen går videre inni kanalen (1). Via vektstangen (9), som er opplagret i (13), tvinges spjeldet (3) ned og stenger kanalen (1). Figurene 1 og 5 viser posisjonen ved stengt kanal. Det oppstår et støt som bevirker en trykkøkning i bølgen, slik at tilbakeslagsventilen (5) åpnes og vann strømmer gjennom åpningen (6) inn i beholderen (2). Når trykket avtar i kanalen vil ventilen (5) stenge åpningen (6). Vektarmen (9) går ned slik at spjeldet (3) åpner kanalen igjen. Dette gjentas for hver store bølge som kommer. Et annet alternativ til spjeldets åpningsmekanisme er vist på figur 6. Her tenkes at spjeldet åpnes og stenges vha av en hydraulisk sylinder (13). Aktivatoren (5) kan også være styrt av en hydraulisk sylinder. Samkjøringen av (15) og (5) kan da programmeres og styres f eks vha bølgereregistrator. Når trykket er stort nok i beholderen (12) åpnes magnetventilen (11) og vannet går til en turbin for strømproduksjon, eventuelt at vannet går til et reservoar.



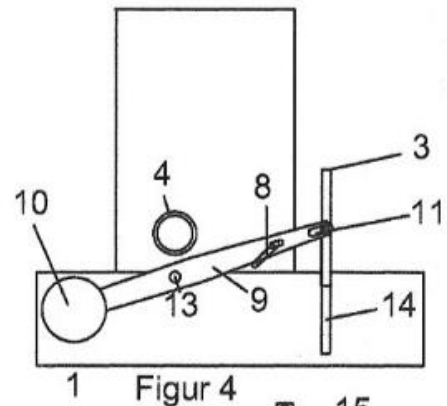
Figur 1



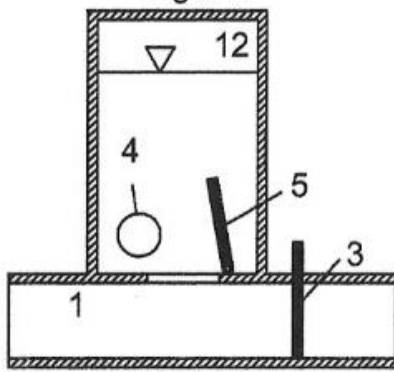
Figur 2



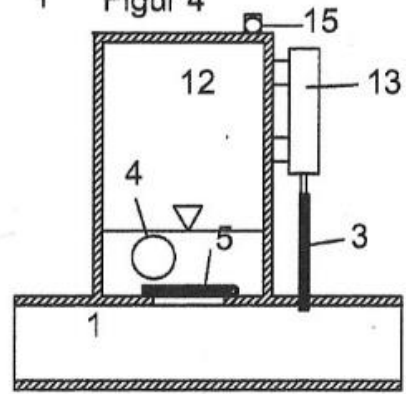
Figur 3



Figur 4



Figur 5



Figur 6

Vedlegg B

I dette vedlegget er dataen fra bølgedataen fra Jarens Rev ved Stavanger gitt. Dette er et stort datasett, og er gitt ved en separat fil ved biblioteks systemet Brage.