



# Alternative energikilder for el-sjark

**VERSJON**  
1.0.1**DATO**  
2016-09-19**FORFATTER(E)**  
Jørgen Haavind Jensen**OPPDRAGSGIVER(E)**  
FHF**OPPDRAGSGIVERS REF.**  
901194**PROSJEKTNR**  
6022240**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**  
20**RAPPORTNR**  
A27817**ISBN NUMMER**  
978-82-14-06096-6**SAMMENDRAG**

Formålet med denne studien har vært å evaluere ulike konsepter for høsting av energi fra vær og vind til havs. Utgangspunktet for studien er Selfas nye hybrid-sjark «Karoline». Denne baserer seg på elektrisk fremdrift, batteri som energikilde og et dieselaggregat for lading av batteriet når man ikke har landstrøm. Mekanismer for å hente energi ut av bølger, vind eller sol vil redusere behovet for å bruke dieselaggregatet, og under enkelte sjøvær kan man sannsynligvis basere seg på landstrøm og energiutvinning alene.

Denne studien har fokusert på oppnåelig energimengde og effekt. Mekanisk implementasjon, kostnad, slitasje, mekanisme-og-konverteringstap og lignende er ikke evaluert i denne omgang, kun idealisert analyse av mulig effektutvinning sammenlignet med relevante hoveddimensjoner (vekt, volum, areal, o.l.). I den grad det har vært mulig er det forsøkt å gjøre analysen dimensjonsuavhengig, altså at den vil kunne brukes for skip av ulik størrelse, men i simuleringsanalysen og regneeksemplene er det brukt en 10.6 meter lang sjark, og det er denne som er utgangspunktet i diskusjonene.

Fire ulike konsepter er evaluert.

1. Oscillerende masse-fjær-demper system. Dette fungerer litt som en rulledempetank, men med fast masse i stedet for vann. Generatoren vil ta rollen til dempekraft i systemet.
2. Bevegelig foil eller plate som er nedsenket i vann. Bølger og skipets bevegelser påfører kraft på foilen som så brukes til å drive en generator.
3. Solcelle.
4. Vindmølle.

**UTARBEIDET AV**  
Jørgen Haavind JensenSIGNATUR **KONTROLLERT AV**  
Karl-Johan ReiteSIGNATUR **GODKJENT AV**  
Hanne DigreSIGNATUR 

1	Masse-fjær-generator .....	2
1.1	Teoretisk analyse .....	2
1.1.1	Utledning av designligning .....	2
1.2	Simuleringstudie .....	4
1.2.1	Simuleringsresultater for sidesjø .....	5
1.2.2	Simuleringsresultater for møtende sjø .....	6
1.3	Diskusjon .....	6
2	Foilgenerator .....	7
2.1	Teoretisk analyse .....	7
2.1.1	Bevegelsesligning og diskusjon .....	7
2.2	Simuleringsstudie .....	8
2.2.1	k, d parametervariasjon .....	8
2.2.2	k, d, areal parametervariasjon .....	9
2.2.3	Arm, periode, bølgehøyde parametervariasjon .....	10
2.3	Diskusjon .....	11
3	Solcelle .....	13
3.1	Breddegrad, årstid, og døgnvariasjon .....	14
3.2	Særskilte forhold for skip .....	15
3.3	Konklusjon .....	15
4	Vindmølle .....	16
4.1	Vindmotstand .....	16
4.1.1	Seiling mot vinden .....	17
5	Oppsummering .....	18
5.1	Masse-fjær-generator .....	18
5.2	Foilgenerator .....	18
5.3	Solcelle .....	18
5.4	Vindmølle .....	19
5.5	Kvantitativ sammenligning .....	19
5.6	Konklusjon .....	20

## 1 MASSE-FJÆR-GENERATOR

Konseptet baserer seg på en tung vekt som er fri til å bevege seg langs en skinne eller annet oppheng i båten. Båtens bevegelser "pumper" kinetisk energi inn i massen og potensiell energi inn i en eventuell opphengsfjær. Overskuddsenergien kan så hentes ut igjen av en generator.

Mekanisk implementasjon av oppheng og energiutvinning vil ikke bli evaluert, kun en idealisert teoretisk modell av et masse-fjær-demper-system, med fokus på hoveddimensjoner (vekt, lengde, effekt, osv.)

Konseptet er evaluert først ved en teoretisk utledning av en "designligning", og så ved en simuleringsstudie. Formålet med simuleringsstudien blir i hovedsak å verifisere designligningen.

### 1.1 TEORETISK ANALYSE

Følgende modell er brukt i den teoretiske analysen:

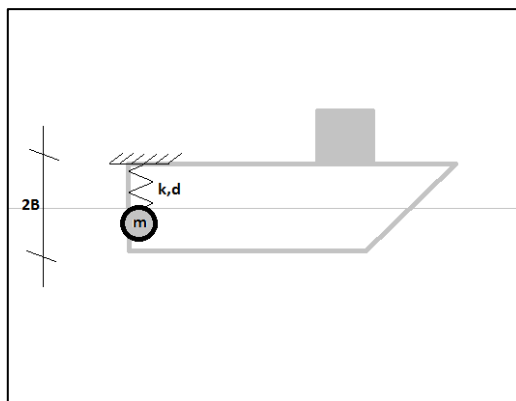
En masse  $m$  er opphengt i en fjær med fjærkoeffisient  $k$ .

Generatoren er modellert som en dempekoeffisient  $d$ .

Skipets bevegelser er modellert ved at opphengspunktet beveger seg vertikalt i en regulær sinuskurve med amplitude  $A$  og vinkelhastighet  $\omega$ , der  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  og  $T$  er fartøyets svingeperiode. Systemets påvirkning på skipets bevegelser er ikke modellert.

Skinnelengden er modellert ved at svingeamplituden til massen under analysen skal begrenses til en amplitude  $B$ .

Den teoretiske utledningen tar sikte på å lage en designligning som uttrykker "maksimal effekt" som en funksjon av designparametere ( $m$ ,  $k$ ,  $d$ ,  $B$ ), og eksterne parametere ( $A$ ,  $\omega$ ) som er en funksjon av sjøtilstand og skipets dynamikk.



Figur 1: Båt med opphengt fjær-masse system

#### 1.1.1 UTLEDNING AV DESIGNLIGNING

Bevegelsesligningen for massen kan skrives på følgende måte:

$$m\ddot{z} + d\dot{z} + kz = kA \sin(\omega t) + dA\omega \cos(\omega t)$$

Ved å se på massens relative posisjon til båten ( $x$ ) istedenfor absolutt posisjon ( $z$ ) kan ligningen endres til:

$$x = z - A \sin(\omega t), \quad \dot{x} = \dot{z} - A\omega \cos(\omega t), \quad \ddot{x} = \ddot{z} + A\omega^2 \sin(\omega t)$$

$$m(\ddot{x} - \omega^2 A \sin(\omega t)) + d\dot{x} + kx = 0$$

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = m\omega^2 A \sin(\omega t)$$

Stasjonærløsningen (steady state, uten transienter) til  $x$  kan da skrives som:

$$x(t) = A \frac{m\omega^2}{\sqrt{m^2\omega^4 + (d^2 - 2km)\omega^2 + k^2}} \sin(\omega t + \varphi)$$

I denne analysen er vi ikke interessert i fasen  $\varphi$  eller tidsvariasjonen  $\sin(\omega t)$ , kun amplituden  $\mathbf{B}$ , som kan skrives som  $\mathbf{A}$  multiplisert med en transferfunksjon:

$$B = A \frac{m\omega^2}{\sqrt{m^2\omega^4 + (d^2 - 2km)\omega^2 + k^2}}$$

Dersom amplituden  $\mathbf{B}$  er gitt, kan den gjennomsnittlige effekten skrives som:

$$Power_{avg} = \frac{d\omega^2 B^2}{2}$$

$$Power_{avg} = \frac{A^2}{2} \cdot \frac{dm^2\omega^6}{m^2\omega^4 + (d^2 - 2km)\omega^2 + k^2}$$

Dersom  $\mathbf{B}$  og  $\omega$  er gitt ser vi at effekten maksimeres av størst mulig  $\mathbf{d}$ . Samtidig vil  $\mathbf{d}$  påvirke hvor stor  $\mathbf{B}$  det er mulig å oppnå. Dersom vi løser amplitudeligningen for  $\mathbf{d}$  får vi:

$$d^2 = \left( \left( \frac{A}{B} \right)^2 - 1 \right) m^2 \omega^2 + \frac{k}{\omega^2} (2m\omega^2 - k)$$

Verdien for  $\mathbf{k}$  som maksimerer  $\mathbf{d}$ , gitt alle andre parametere er:

$$k = m\omega^2$$

Dette gir oss første designligning: "*fjærstivheten  $\mathbf{k}$  som maksimerer effekten for en gitt frekvens*"

Det er verdt å merke seg at dette er den fjærstivheten som tilsvarer resonans i et udempet system.

Dersom vi setter det resultatet tilbake i ligningen reduseres ligningen for  $\mathbf{d}$  til:

$$d = \frac{A}{B} m\omega$$

Dette gir oss andre designligning: "*dempkoeffisienten  $\mathbf{d}$  som maksimerer effekten for en gitt frekvens*"

Alternativt, "*dempkoeffisienten som begrenser svingeamplituden til  $\mathbf{B}$ , gitt en eksiterende amplitude  $\mathbf{A}$* "

Dersom vi setter disse uttrykkene for  $\mathbf{k}$  og  $\mathbf{d}$  inn i ligningen for gjennomsnittlig effekt får vi følgende:

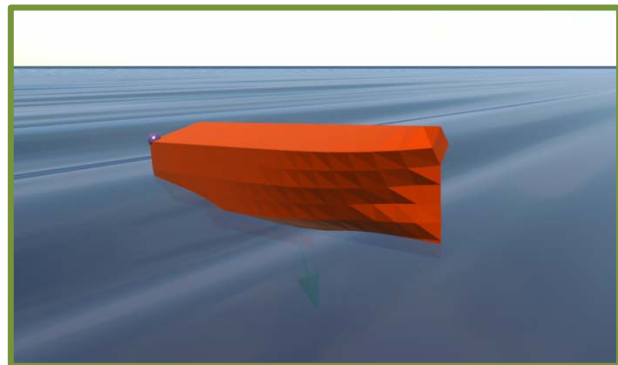
"*maksimal effekt som er mulig å hente ut av et lineært masse-fjær-system med masse =  $\mathbf{m}$ , ved en gitt frekvens  $\omega$ , eksiterende amplitude  $\mathbf{A}$ , og tilgjengelig svingeamplitude  $\mathbf{B}$* "

$$Power_{avg} = \frac{m\omega^3 AB}{2}$$

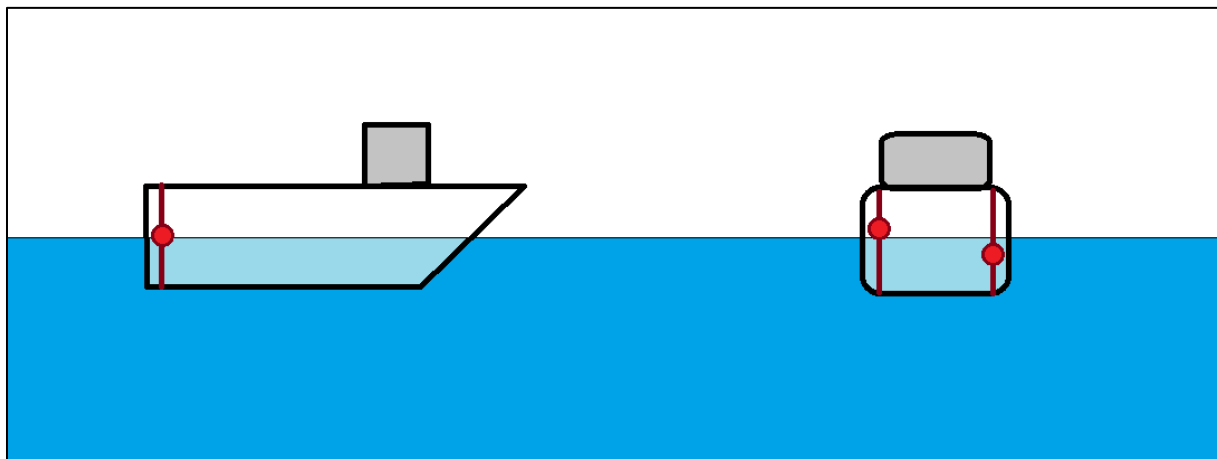
## 1.2 SIMULERINGSTUDIE

For simuleringstudien er det fokusert på følgende konsept (se skisse under). To opphengte masser på 100 kg hver. Massene er plassert bak på hekken på hver side, og er fri til å bevege seg langs en vertikal akse på båten. Plasseringen er valgt fordi dette er antatt å gi stor eksiterende bevegelse, og følgelig mest energi og bevegelsesdemping i både stamp- og rull-bevegelse. I tillegg vil denne plasseringen som regel være mest mulig "unna veien" for øvrige

konstruksjonshensyn. Båtmodellen (Figur 2) er basert på skroglinjer fra en moderne 10.6 m sjark på 20 tonn.



Figur 2: Visualisering av skrogform i møtende langkammert sjø

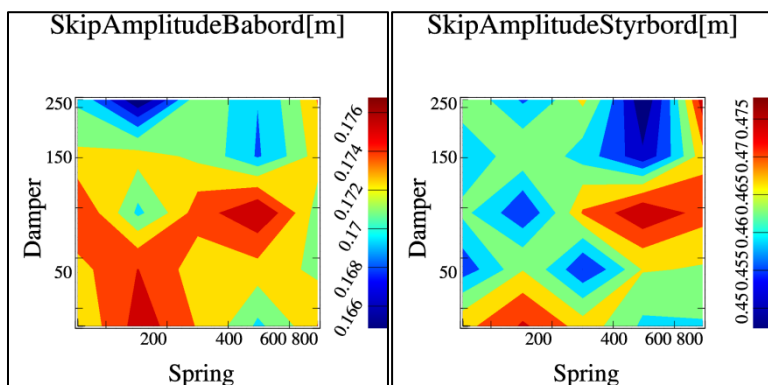


Figur 3: Konseptskisse for masse-fjær energihøstesystem

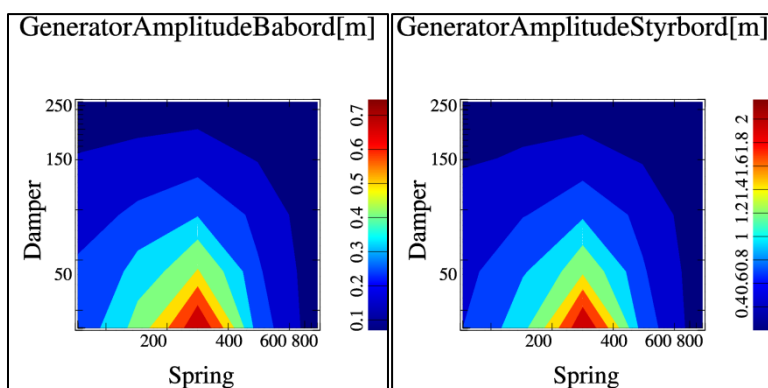
Studien baserer seg på to hovedcase: Sidesjø og møtende sjø. Båten har null hastighet i begge tilfeller. Hvert case er utført som en parametervariasjonsstudie med hensyn på fjærstivhet  $k$  og dempekoeffisient  $d$ .

Sjøtilstanden er basert på et langkammert JONSWAP-spekter med signifikant bølgehøyde 1 m, og topp-periode på 2.5 s. Det tilsvarer en topp-frekvens på 1.74 rad/s. I følge designligningen skal fjærstivheten som gir maksimal energiutvinning ligge på  $k=300$  N/m. Optimal generatorordemping vil avhenge av båtbevegelsen og designparameter  $B$ , men dersom vi tar utgangspunkt i at en 1 m-sjøtilstand burde kunne gi en bevegelsesamplitude på  $A=0.5$  m, og setter  $B=1$  m, burde  $d=87$  Ns/m være et plausibelt første estimat. Effekten burde da ligge rundt 260 W totalt for begge generatorene.

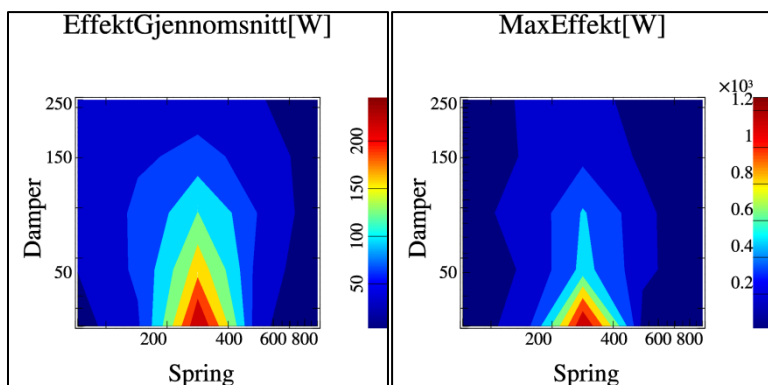
### 1.2.1 SIMULERINGSRESULTATER FOR SIDESJØ



Figurene med tittel "SkipAmplitudeBabord" og "SkipAmplitudeStyrbord" viser den vertikale bevegelsen til båten på henholdsvis styrbord og babord side ved festepunktet til generatorene. Tallene er uttrykt som statistisk standardavvik multiplisert med  $\sqrt{2}$  for å finne en ekvivalent sinus-amplitude. Vi ser at bevegelsene på babord side er vesentlig mindre enn på styrbord. Basert på disse amplitudeverdiene reduseres effekt-estimatet til ca. 160 W for  $B=1$ , antakeligvis litt mindre siden dempekoeffisienten på babord side ikke lengre vil være optimal.



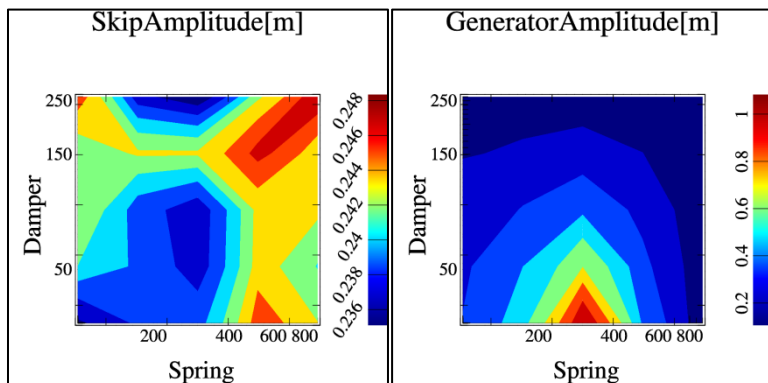
Figurene med tittel "GeneratorAmplitudeBabord" og "GeneratorAmplitudeStyrbord" viser svingeamplituden til generatormassene. Tallene er uttrykt som statistisk standardavvik multiplisert med  $\sqrt{2}$  for å finne tilsvarende sinus-amplitude. Grafen viser at svingeamplituden på styrbord side ligger rundt 1 med en dempefaktor på ca. 80 Ns/m og fjærkonstanten tunet til resonans, i henhold til teorien.



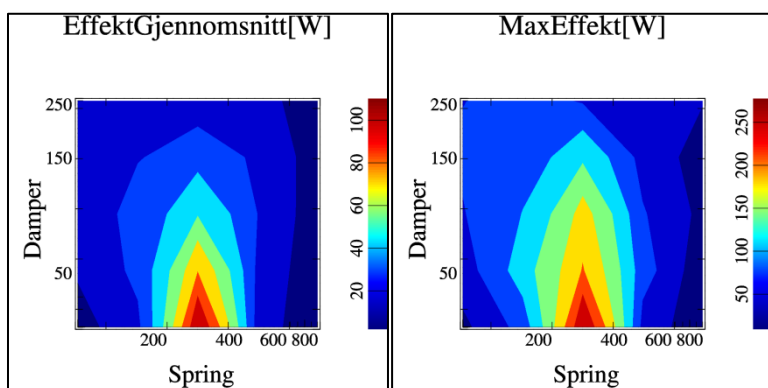
Figuren med tittel "EffektGjennomsnitt" viser effekten for begge generatorene, midlet over 400 sekund. Figuren med tittel "MaxEffekt" viser største effekt-topp over samme periode, filtrert over ca. 20 sekund for å fjerne støy. Plottet viser at høyeste effekt oppnås ved fjærkoeffisient ca. 300N/m, i henhold til teori. Lavere

demping gir høyere effekt, men da på bekostning av høyere svingeamplitude. Ved en svingeamplitude ca. 1 m, er effekten på ca. 140 W, som er litt lavere enn det teoretiske anslaget, noe som er forventet ettersom babord og styrbord side har ulik bevegelsesamplitude.

### 1.2.2 SIMULERINGSRESULTATER FOR MØTENDE SJØ



I møtende sjø er styrbord og babord side symmetrisk, så det holder å oppgi en enkelt amplitudeverdi for skips- og generatoramplitude. En eksisterende amplitude på ca. 0.24 m skal tilsi en summert effekt på 126 W for begge generatorene ved 1 m svingeamplitude. Dette skal inntreffe ved en dempekoeffisient på ca. 40 Ns/m, noe vi kan se ut fra plottet "GeneratorAmplitude" at det gjør.



### 1.3 DISKUSJON

Simuleringene verifiserer i stor grad designligningene. Det antas derfor at designligningene kan benyttes som utgangspunkt for vurderinger av konsept, og at videre simuleringer bør gjøres for slike konkrete design. For å gå videre trenger man derfor å vurdere konkrete skip, slik at man kan ta utgangspunkt i transferfunksjonen for en bestemt skrogform.

Den produserte effekten man oppnår her er ikke overveldende, men disse estimatene er gjort ved en moderat sjøtilstand med 1 m bølgehøyde. Det er sannsynlig at andre plasseringer på skroget kan gi høyere eksitasjonsamplitude, og økning i de svingende massene vil også øke effekten i systemet.

## 2 FOILGENERATOR

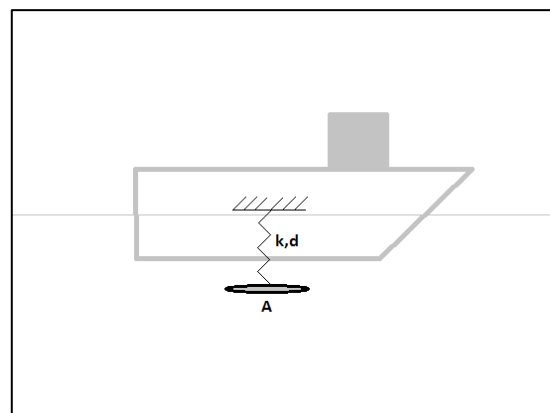
Konseptet baserer seg på en foil eller plate som er festet under båtens vannlinje i en skinne eller svingarm. De hydrodynamiske kreftene på platen virker mot båtens bevegelser og brukes til å drive en generator koblet til skinnen/svingarmen.

En teoretisk utledning av en designligning av samme typen som for masse-fjær-systemet er ikke utført siden fysikken i dette tilfellet er langt mer kompleks, men noen teoretiske betraktninger er likevel utført, blant annet for å se hvilke aspekter som bør inngå i parameterstudien. For kvantitative resultater er det simuleringsstudien som blir viktigst.

### 2.1 TEORETISK ANALYSE

Den teoretiske modellen for å analysere foilen er tilsvarende modellen som er brukt for å analysere masse-fjær-systemet, med noen modifikasjoner:

Massen til foilen vil i den dynamiske analysen typisk være dominert av hydrodynamisk tilleggsmasse. Tilleggsmassen er i simuleringene satt til  $m_A = 1025 \frac{kg}{m^3} \frac{4}{3\sqrt{\pi}} * Area^{3/2}$ , som tilsvarer en kule med samme projiserte areal.



Figur 4: Båt med montert foil

#### 2.1.1 BEVEGELSESLIGNING OG DISKUSJON

Bevegelsesligningen for foilen kan skrives som:

$$(m + m_A)\ddot{z} + d\dot{z} + kz = kA \sin(\omega t) + dA\omega \cos(\omega t) - D|\dot{z} + \gamma \sin(\omega t + \delta)|(\dot{z} + \gamma \sin(\omega t + \delta)) - m_A\omega \gamma \cos(\omega t + \delta)$$

Dette er samme ligningen som for masse-fjær-systemet, men med tilleggsledd for hydrodynamisk drag:

$$-D|\dot{z} + \gamma \sin(\omega t + \delta)|(\dot{z} + \gamma \sin(\omega t + \delta))$$

..og added-mass trykk-kraft:

$$-m_A\omega \gamma \cos(\omega t + \delta) - m_A\ddot{z}$$

$D$  er en samlet hydrodynamisk dragkoeffisient  $D = \frac{1025^{kg/m^3}}{2} \cdot C_D \cdot Area$

$\gamma$  er amplituden til bølgebevegelsen, og  $\delta$  er faseforskjellen mellom bevegelsen til opphengspunktet til foilen, og bølgebevegelsen.

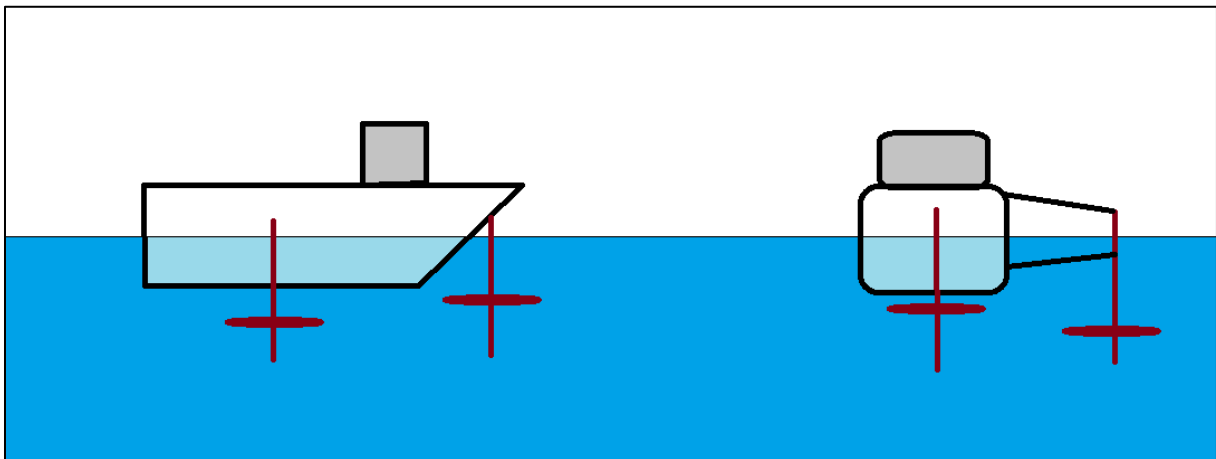
Det er flere ting som vanskeliggjør en forenklet teoretisk analyse:



- Det ikke-lineære leddet for hydrodynamisk drag. Dette kan kanskje til en viss grad overkommes ved å sette en ekvivalent linearisert koeffisient, f.eks.  $\hat{D} = D|\dot{z}_{design}|$ .
- $\gamma$  og  $\delta$  varierer med sjøtilstand, sjøretning, dybde, bølgefrequens, skipets bølgetransferfunksjon, og plasseringen av foilen på skipet. Hvorvidt skipets og bølgenes bevegelser er i fase eller motfase vil ha avgjørende betydning på resultatet. Det vanskeliggjør også en linearisering av det hydrodynamiske drag-leddet.
- Dersom man trekker erfaringer fra masse-fjær-analysen er det grunn til å tro at en optimal lineær analyse vil søke å skape resonans ved å sette fjærkonstanten til  $k \approx (m + m_A)\omega^2$ . Det er usikkert hvorvidt dette vil være fysisk relevant, med tanke på nærheten til fri overflate og den hydrodynamiske påvirkningssonen til båten, og aktuelle Keulegan-Carpenter tall. Det kan tenkes at en mer korrekt og robust designtilnærming baserer seg på en ganske lav verdi for fjærkonstant, og så øker man generatordempingen til man når en maksverdi for effekt.

## 2.2 SIMULERINGSSTUDIE

To konsepter er evaluert i simuleringsstudien (Figur 5). En sentralt plassert baugfoil i møtende sjø, og en foil på en sidearm i sidesjø. Foilen er satt til 2 m<sup>2</sup>, med vekt på 20 kg. Sidearmen er satt til 5 meter ut fra båtens sentrallinje. Båtmodellen er basert på skroglinjer fra en moderne 10.6 m sjark på 20 tonn.

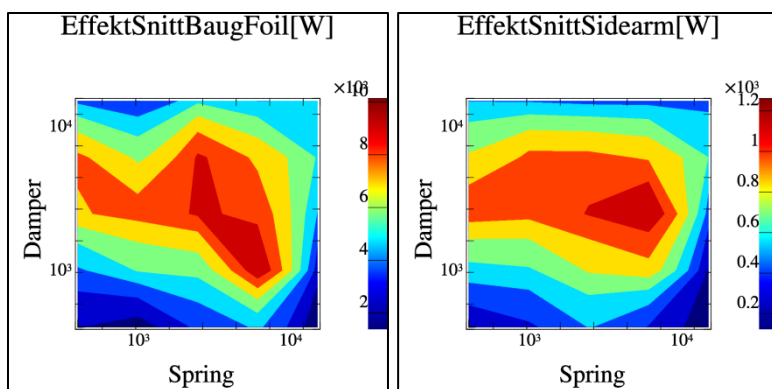


Figur 5: Konseptskisse for foil energihøstesystem

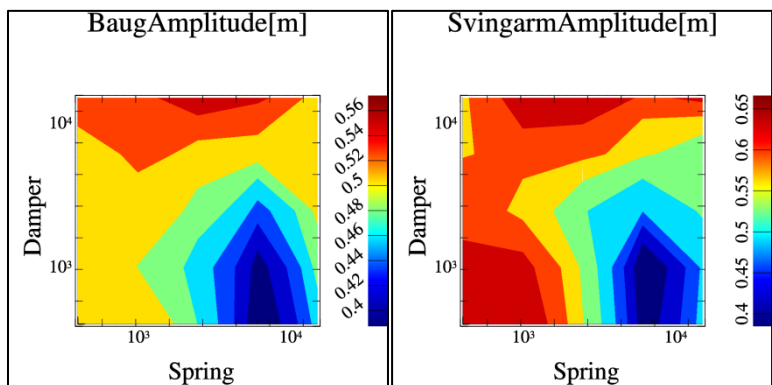
Sjøtilstanden er basert på et langkammert JONSWAP-spekter med signifikant bølgehøyde 1 m, og topp-periode på 2.5 s.

### 2.2.1 K, D PARAMETERVARIASJON

Første skritt er å finne størrelsesorden på fjærstivhet og generatordemping (k,d). Begge parameterne er variert i 5 logaritmiske trinn fra en minimumsverdi til en maksimumsverdi. Fjærstivheten går fra 400 N/m til 15 kN/m og generatordempingen fra 400 Ns/m til 15 kNs/m. Alle permutasjoner har blitt simulert, og snitteffekten har blitt beregnet.



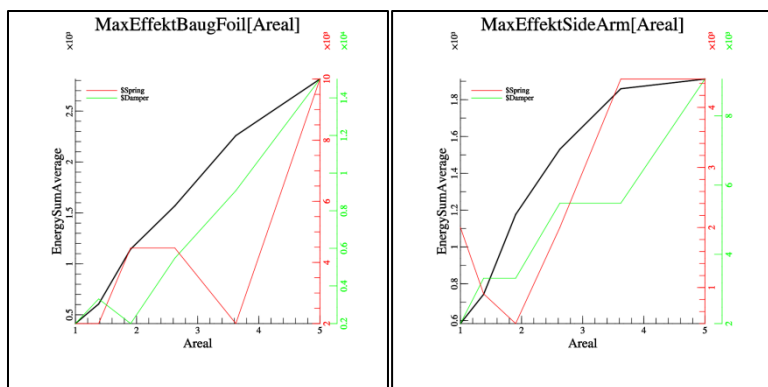
Plottene over viser gjennomsnittlig effekt for henholdsvis baugmontert og sidemontert foil. I likhet med masse-fjær systemet ser vi en effekt-topp hvis vi tuner fjærkonstanten i nærheten av resonans ( $k = (m + m_A)\omega^2 \approx 6600$ ), men i dette tilfellet øker ikke effekten ubegrenset når man reduserer dempingen. Utvinningsgraden er jevnt over mindre avhengig av fjærkonstanten enn den var i masse-fjær systemet. Det er mulig å oppnå nært maksimal effekt selv for ganske lave fjærkonstanter.



Plottene for vertikal bevegelsesamplitude for opphengspunktene viser en signifikant påvirkning på bevegelsen til skipet, men hvorvidt foilen bidrar til å dempe eller forsterke bevegelsen er det ikke nødvendigvis grunnlag for å si noe om her.

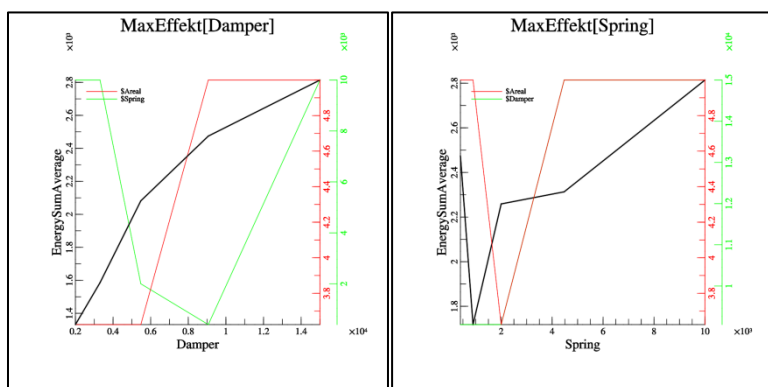
### 2.2.2 K, D, AREAL PARAMETERVARIASJON

For å finne ut hvordan effekten skalerer med foil-areal er det utført en parametervariasjon på fjærstivhet, generatordemping og areal. Alle parameterne er variert i 5 logaritmiske trinn fra en minimumsverdi til en maksimumsverdi. Fjærstivheten går fra 400 N/m til 10 kN/m, generatordempingen fra 2 kNs/m til 15 kNs/m og foil-arealet fra 1 m<sup>2</sup> til 5 m<sup>2</sup>. Alle permutasjoner har blitt simulert, og snitteffekten har blitt beregnet.



Plottene over viser maksimal gjennomsnittlig effekt som funksjon av foil-areal. For hvert areal er det valgt ut den kombinasjonen av fjærstivhet( $\$Spring$ ) og generatordemping( $\$Damper$ ) som ga høyest effekt. De aktuelle verdiene for fjær og demping som ga best resultat er tegnet i samme plot.

Vi ser en ganske regulær sammenheng mellom foil-areal og effekt, samt mellom foil-areal og optimal generatordemping. Sammenhengen mellom foil-areal og optimal fjærkonstant er ikke like entydig.



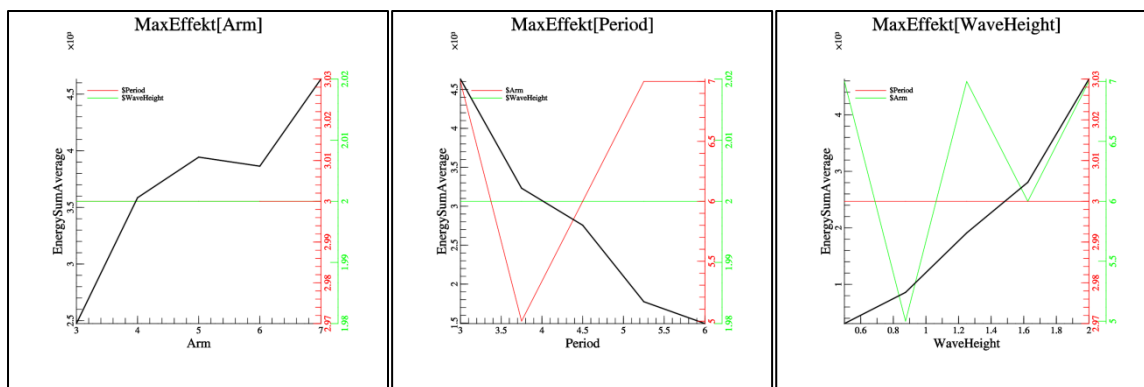
Begge plottene over viser maksimal effekt av en baugfoil, med hensyn på henholdsvis generatordemping og fjærkonstant. Begge plottene viser det samme, nemlig at generert effekt korrelerer godt med areal og generatordemping, mens fjærkonstanten har en mer uforutsigbar virkning.

### 2.2.3 ARM, PERIODE, BØLGEHØYDE PARAMETERVARIASJON

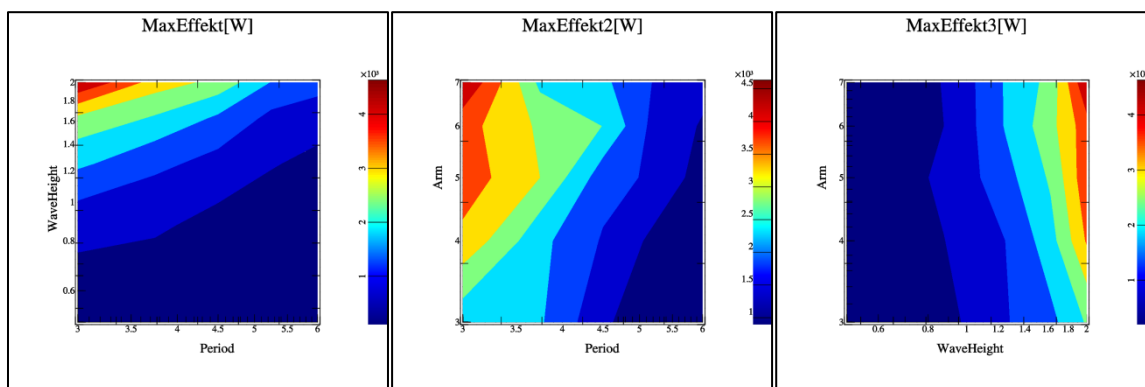
Den teoretiske analysen antydte at fasen og størrelsesforholdet mellom bølgen og båtens bevegelse kan være en viktig faktor. Det er derfor gjort en parameterstudie for å finne effekten av dette, samt studere hvordan bølgefrequensen påvirker resultatet. Kun rullbevegelse i sidesjø er studert i dette caset. Foil-arealet er satt til  $2 \text{ m}^2$ , fjærkonstanten er satt til  $1 \text{ kN/m}$  og generatordempingen er satt til  $2 \text{ kNs/m}$ .

Lengden på sidearmen, bølgeperioden, og bølgehøyden er variert i 5 aritmetiske steg fra en minimumsverdi til en maksimumsverdi.

Armen varierer fra 3 m til 7 m (på lesiden). Bølgeperioden varierer fra 2.5 s til 5 s topp periode (i plottene definert ut fra gjennomsnittlig periode: 3 - 6 sekund). Bølgehøyden varierer fra 0.5 m til 2 m.



Plottene over viser maksimal effekt som funksjon av henholdsvis foil-arm, bølgeperiode, og bølgehøyde. De viser, ikke overaskende, at høye bølger med høy frekvens gir høy effekt. Denne relasjonen er helt entydig. Armlengden gir noe mindre entydige resultater, selv om hovedtendensen også her er at lengre arm gir høyere effekt.



Plottene over viser igjen maksimal effekt, men denne gangen som konturplot. To-og-to variabler er valgt ut som plot-akser, og for den tredje variabelen er det valgt ut den simuleringen som ga høyest effekt. Samme resultat vises her; høye bølger med høy frekvens gir høy effekt. Også her ser vi at armlengden gir noe mindre entydige resultat. Plottet for Arm-vs-Periode viser noe som kan ligne på en frekvensavhengig topp, som tyder på at bølge-vs-båt bevegelsene går inn og ut av fase. Det er også mulig at det vi ser er at når armen blir veldig lang, gjør momentarmen at noe av hiv-bevegelsen konverteres til rull-bevegelse i stedet for å konverteres til energi. Det er derfor ikke sikkert at energipotensialet vil vokse ubegrenset når armen forlenges.

## 2.3 DISKUSJON

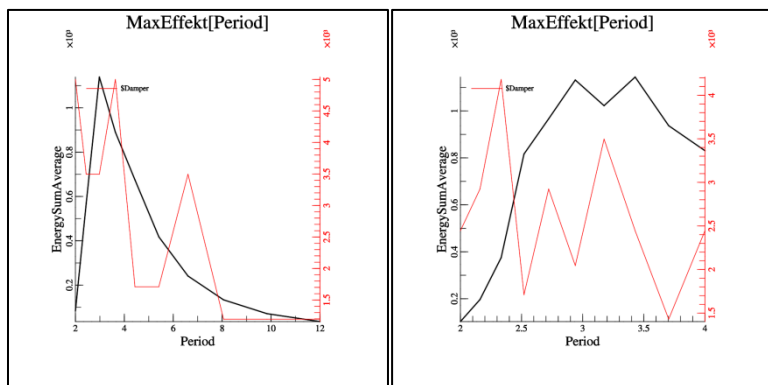
Det kan være nyttig å ha en ide om effektskaleringen. Selv om det ikke lykkes å utlede en lov fra første prinsipper kan man gjøre noen empiriske betraktninger rundt simuleringresultatene.

Fra resultatene i kapittel 2.2.2 ser det ut som at effekten skalerer omtrent lineært med foil-arealet. Dette virker plausibelt ettersom den hydrodynamiske kraften er proporsjonal med arealet. Det er trolig at den utflatingen vi ser for side-arm skyldes at foilen etterhvert får stor bevegelsesdempende effekt.

Fra kapittel 2.2.3 ser vi at skaleringen er omtrent kvadratisk med bølgehøyden, noe som stemmer bra med hva hydrodynamisk teori sier om bølgeenergi.

Skaleringen med bølgefrequens er omtrent  $\omega^{-1.6}$ , men denne verdien vil avhenge av skipets egen frekvensrespons, så det er usikkert hvor universelt gyldig den vil være. Dataområdet er også litt lite til å si noe sikkert. Merk at dette tallet ikke kan sammenlignes direkte med designligningen for masse-fjær generator. For det første var skipets frekvensrespons utelatt fra betraktningen. For det andre var det antatt optimal fjær- og

dempekoeffisient for hver enkelt frekvens, men i simuleringene i kapittel 2.2.3 er koeffisientene holdt fast. Ut fra et strikt dimensjonsargument er det rimelig å anta at skaleringen er  $\omega^3$ , som var tilfellet for masse-fjær generatoren, men med en attenuering fra skipets egen frekvensrespons. For å finne ut av dette er det gjort en ekstra simulering med parametervariasjon på demping og bølgefrequens. Begge parameterne er variert i 10 logaritmiske trinn, dempekoeffisienten fra 200 Ns/m til 5 kNs/m og perioden fra 2.4 s til 14.4 s topp-periode (2 s til 12 s snittperiode). Det er også gjort en mer detaljert studie rundt resonanstoppen fra 2 s til 4 s. Resultatet er vist i plottet under.



Verdien som er plottet er beste effektresultat for den aktuelle perioden, og den tilhørende dempeverdien som ga resultatet. Hvis vil holder oss litt unna effektoppen rundt 3 s, og gjør en kurvetilpasning fra 4 s og utover finner vi at  $\omega^{-2.8}$  gir et godt resultat. Ut fra det tidligere nevnte dimensjonsargument er det rimelig å runde skaleringsfaktoren fra 2.8 til 3.

Armlengden er det vanskelig å si noe sikkert om. Blant annet har den en frekvenstopp som vanskeliggjør en regresjonsanalyse. Det også mulig at momentarmen etterhvert vil konvertere hiv-bevegelsene til rull i stedet for energi. Fra et rent dimensjonsargument er det rimelig å anta lineær skalering, og dette stemmer ikke alt for dårlig med simuleringresultatene fra kapittel 2.2.3 heller. Det gjøres oppmerksom på at denne faktoren har et begrenset gyldighetsområde. Den er tatt med for å oppnå rent dimensjonsløse skaleringsfaktorer, slik at man kan bruke ligningen på større skip.

Et forslag til skaleringslov for frekvenser over båtens egenfrekvens, gitt at foilens arm og areal er lite nok til ikke å påvirke båtens bevegelser vesentlig, er dermed:

$$Power_{avg} = 0.015 \rho \omega^3 LAH^2$$

$\rho$  er tettheten til vann, 1025 kg/m<sup>3</sup>, L er armlengden, A er foilarealet, H er bølgehøyden, og  $\omega$  er bølgefrequensen i radianer.

### 3 SOLCELLE

Effekten fra et solcellepanel er i hovedsak bestemt av 3 ting:

1. Areal
2. Virkningsgrad
3. Solflux

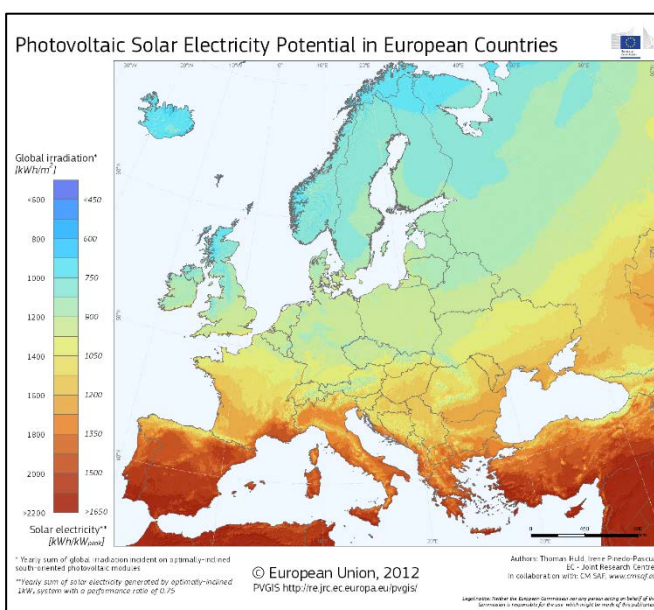
Beregningene herfra vil ta utgangspunkt i "Watt per kvadratmeter panel", så areal vil fungere som en variabel designparameter.

**Virkningsgrad** for kommersielle solceller i dag ligger typisk mellom 15 % til 30 %. Altså at [15 % - 30 %] av den totale lysenergien som faller inn på panelet vil konverteres til elektrisk energi. Det faktiske tallet vil variere med solcelleteknologi, lyskvalitet, temperatur, etc. For videre beregninger vil det benyttes en flat verdi på 20% som er antatt som representativ for alminnelige kommersielle paneler.

**Solflux** er den totale innstrømmende lysenergien og er definert som Watt per kvadratmeter. Den effektive solfluxen er bestemt av:

1. Breddegrad, årstid, og tid på døgnet
2. Konstant atmosfæreattenuering pluss variabel værattenuering
3. Panelets orientering i forhold til solen

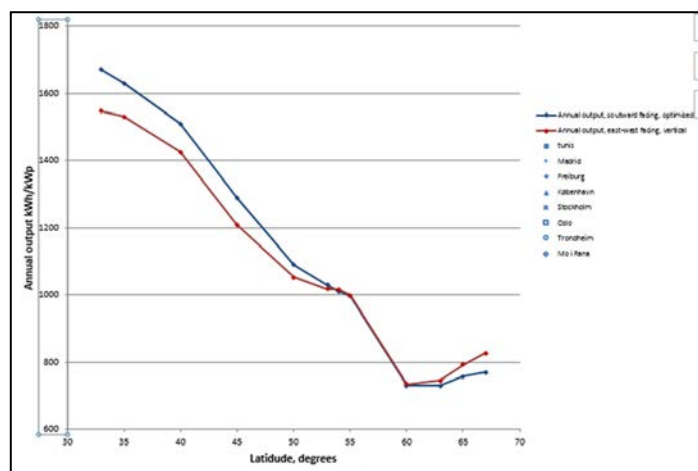
"Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries" anslår en solflux på ca. 900 kWh/m<sup>2</sup> per år for Norge. Omregnet gir dette en verdi på 100 W/m<sup>2</sup>. Dette er under antagelsen at panelet er optimalt orientert.



Data fra

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>

anslår verdier på omtrent 750 kWh/m<sup>2</sup> per år (85 W/m<sup>2</sup>) for et sett med paneler plassert mellom breddegrad 60° - 67° nord (Oslo til Mo i Rana)

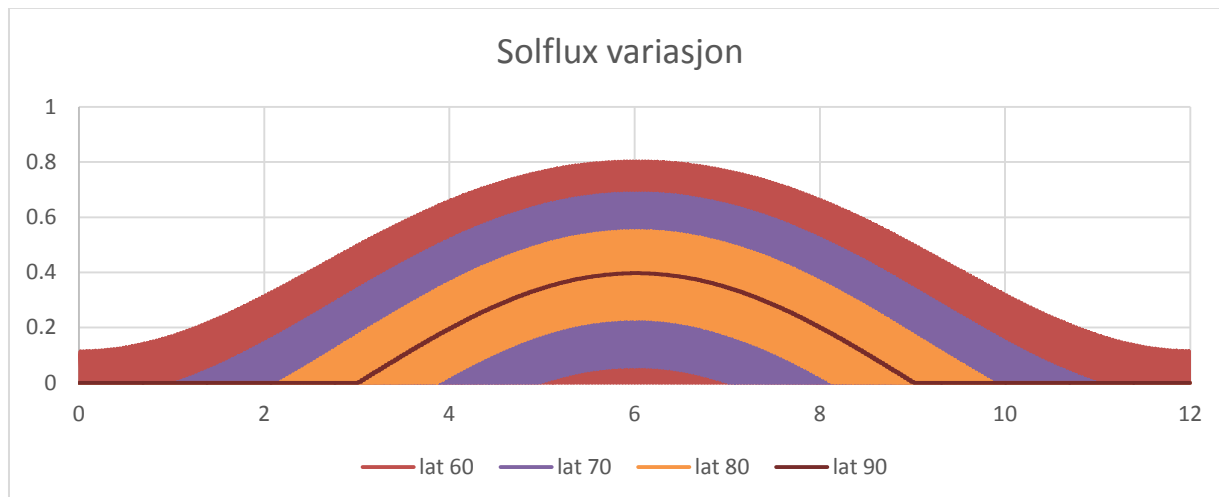


Dette er målte verdier, og tar dermed hensyn til lokale vær- og skyggeforhold. Det finnes kun landmålinger, og de går ikke lengre nord enn ca. 67° nord. Stigningen i kurven fra 60° og opp kan muligens forklares ut fra særskilte lokale forhold, men hovedtendensen er at energipotensialet avtar omtrent som cosinus av breddegrad, med noen avvik mot polene som forklares ut fra jordas aksehelling mot solen.

For videre beregninger antar vi 85W/m<sup>2</sup> som representativ middelvei for et år.

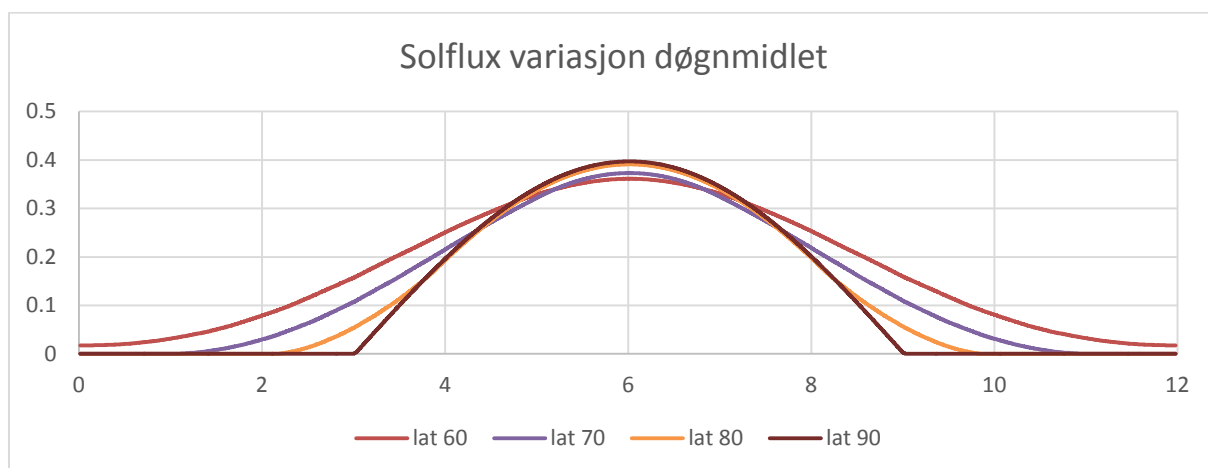
### 3.1 BREDDEGRAD, ÅRSTID, OG DØGNVARIASJON

Ut fra en ren geometrisk betraktning kan man gjøre en teoretisk utledning av hvordan solfluxen vil variere med tid og sted. Dersom vi regner ut jordas posisjon og orientering, time for time, dag for dag, gjennom året får vi følgende plot for variasjon i solflux per kvadratmeter.



Vertikalaksen er en dimensjonsløs skaleringskonstant og viser kun relative forskjeller. Horisontalaksen viser måned i året, men merk at den er ikke direkte koblet til kalendermånedene. Måned 0 tilsvarer solas laveste punkt i året, altså vintersolverv og måned 6 tilsvarer sommersolverv. Fire breddegrader er beregnet, fra 60 til 90 grader nord. Tykkelsen på streken viser variasjonen innad i et døgn, så f.eks. 'lat 90' ligger flatt på 0 halve av året, og med en relativt liten døgnvariasjon i løpet av hele sommerhalvåret. 'lat 60' derimot har stor døgnvariasjon siden solen skal under horisonten hver dag gjennom hele året. Merk at plottene ligger 'oppå' hverandre, så 'lat 60' dekker hele bakgrunnen for de andre plottene.

Dersom vi midler verdiene gjennom et døgn får vi følgende resultat.



Det vi ser her er at forskjellen mellom breddegrader er liten i sommerhalvåret, men sørligere strøk har noe større og jevnere forsyning gjennom året. I praksis er forskjellen mellom helt sør og helt nord langs norskekysten ikke spesielt stor. Det kommer mye an på om driftsmønsteret tjener mest på jevn tilførsel i løpet av døgnet, eller høy makstilførsel midt på dagen.

### 3.2 SÆRSKILTE FORHOLD FOR SKIP

To forhold er viktige for hvordan et skipsmontert solcellepanel vil yte til forskjell fra et landmontert panel, nemlig sekundærrefleksjoner fra havet og stor variasjon i orientering. Dette gjelder dog kun for nært vertikalt monterte panel. Databasen på <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> inneholder ikke målinger fra havet, så vi gjør ikke noe forsøk på å estimere effekten av havrefleksjoner utover å påpeke at det vil virke positivt. Et vertikalt panel vil også vende bort fra solen halvparten av tiden, og den tiden der den vender mot solen vil vinkelen som regel ikke være helt optimal.

Effekten til et vertikalt monterte panel må derfor skaleres med  $\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sin x dx = \frac{1}{\pi} \approx 32\%$

Horisontale panel har derimot den fordelen at de er omtrent like bra/dårlig orientert hele tiden.

### 3.3 KONKLUSJON

Med 85 W/m<sup>2</sup> innkommende effekt i snitt og virkningsgrad på 20% gir dette en midlet effekt på 17 W/m<sup>2</sup>. For vertikal orientering blir tallet 5.5 W/m<sup>2</sup>. For sommerhalvåret vil det være 2-3 ganger så høyt for døgnverdier, og maksimal effekt i løpet av dagen vil ligge rundt 5 ganger så høyt.



## 4 VINDMØLLE

Betz' lov er et teoretisk estimat på den maksimale effekten som er mulig å oppnå med en vindmølle. Den sier at en vindmølle, uansett design, kan aldri utvinne mer enn ca. 60 % av den kinetiske energien i luften som passerer gjennom det effektive tverrsnittsarealet til turbinen. Med "effektivt tverrsnittsareal" menes det arealet turbinvingene sveiper ut i løpet av en omdreining, ikke det statiske vingearialet. Moderne vindmøller er ikke så langt unna denne grensen, gjerne opp mot 50 %, men dette gjelder i hovedsak store vindmøller. Mindre møller, av den typen det kan være aktuelt å montere på en båt, vil vanligvis ha noe lavere virkningsgrad.

Energifluxen per sekund (Watt) i vind med hastighet  $v$  gjennom et tverrsnittsareal  $A$  kan uttrykkes som:

$$P = \frac{\rho}{2} Av^3$$

$\rho$  er her tettheten til luft ( $1.1 \text{ kg/m}^3 - 1.4 \text{ kg/m}^3$  avhengig av temperatur).

Hvis vi gjør det veldig enkelt og antar 30% virkningsgrad, kan vi få en ide om størrelsesordenen på effekten uten å hverken overdrive eller underdrive alt for mye.

	Lett bris	Frisk bris	Stiv kuling	Liten storm
Diameter	4,4 m/s	9,4 m/s	15,5 m/s	22,6 m/s
0,5 m	3W	31W	137W	425W
0,8 m	8W	80W	359W	1113W
1,3 m	21W	210W	940W	2913W
2,1 m	56W	549W	2460W	7626W
3,4 m	147W	1437W	6441W	19964W
5,5 m	386W	3761W	16862W	52268W
9,0 m	1010W	9846W	44145W	136838W

Tabellen over viser teoretisk effekt som funksjon av vindhastighet og diameteren på vindmøllen med 30% antatt virkningsgrad. Det er ikke trolig at en enkelt turbin vil kunne oppnå full ytelse for hele spekteret av vindhastigheter. Man må velge seg et designområde som man optimaliserer for. Det umiddelbart naturlige er å tenke seg at man optimaliserer utvinningsgrad for lavere vindhastigheter, og godtar større relativt svinn for kraftig vind når energitilgangen uansett er god.

### 4.1 VINDMOTSTAND

Med en vindmølle vil det nødvendigvis følge med ekstra luftmotstand på kjøpet, og en høyt plassert kraft kan være problematisk for stabiliteten på en båt. Man kan få et estimat på denne kraften ved å notere seg at sammenhengen mellom kraft og effekt kan skrives som:

$$P = Fv$$

Dette gjelder for et idealisert tilfelle. I realiteten må man skrive det som  $P = \alpha Fv$ , der  $\alpha$  er en skaleringsfaktor som er mindre eller lik 1. I stedet for å estimere skaleringsfaktoren antar vi i den påfølgende analysen at skaleringen lik 1, og gjør det ettertrykkelig klart at dette er en nedre grense for kraft.

Dersom vi setter inn Betz-ligningen for effekten kan kraften uttrykkes som:

$$P = \beta \frac{\rho}{2} Av^3 = \alpha Fv$$

$$F = \frac{\beta \rho}{\alpha 2} A v^2$$

$\beta$  er virkningsgraden som vi her setter til Betz-maximum 60% for å ikke underestimere kraften. Den påfølgende tabellen er altså "nedre grense for maksimalt mulige kraft" i den grad det gir mening. Kraftuttrykket er forøvrig likt uttrykket for drag på en flat disk, med unntak av drag-koeffisienten, så vi kan rimeligvis anta at maksimalkreftene ikke vil ligge betydelig høyere.

	Lett bris	Frisk bris	Stiv kuling	Liten storm
Diameter	4,4 m/s	9,4 m/s	15,5 m/s	22,6 m/s
0,5 m	3N	12N	34N	72N
0,8 m	7N	33N	89N	189N
1,3 m	19N	86N	233N	495N
2,1 m	49N	224N	609N	1296N
3,4 m	129N	587N	1596N	3392N
5,5 m	337N	1536N	4177N	8881N
9,0 m	881N	4022N	10936N	23250N

#### 4.1.1 SEILING MOT VINDEN

I utgangspunktet virker det naturlig å tenke seg at å seile direkte eller nesten direkte opp mot vinden nødvendigvis må ende opp som netto energitap, men dette er ikke selvsagt. For det første er vanlige seilbåter i stand til å krysse ganske langt opp mot vinden, men seiling direkte opp mot vinden, kun drevet av vindkraft kan også være teoretisk mulig. For å se dette kan man tenke seg et teoretisk system med en vindmølle, montert på en skinne med tannhjul. Dersom vindmøllen er direkte koblet til skinnen gjennom et gir med tilstrekkelig høy gir-rate, og tilstrekkelig lav systemfriksjon, er det mulig å bevege seg direkte opp mot vinden. Dette fungerer blant annet fordi det er en absolutt korrelasjon mellom vindmøllens rotasjon -> tannhjulets rotasjon -> vognas framdrift, i.e. "en full omdreining av vindmøllen tilsvarer en bestemt distanse framover". En propell i vann vil ikke være like ideell som et tannhjul i så måte, men dersom propellen er bedre til å omdanne rotasjon til framdrift enn vindmøllen, kan man i teorien seile direkte opp mot vinden. Ved et lignende argument kan man også se at det er teoretisk mulig å seile "med vinden, raskere enn vinden". En mer detaljert analyse av dette faller utenfor rammene av rapporten.

## 5 OPPSUMMERING

En direkte objektiv sammenligning av de fire konseptene er vanskelig ettersom de alle har vidt forskjellige rammeparametere for hvilket miljø de vil yte best i, og ingen åpenbar standard for hva som tilsvarer "et like stort system" når man skal sammenligne en hydrofoil med en vindmølle.

Det var ingen av konseptene som var i stand til å levere så mye effekt at man ikke godt kunne tenke seg enda mer, så i utgangspunktet kunne man tenkt seg å sammenligne det største systemet man får plass til uten at det blir påtrengende for andre hensyn. Dette blir fremdeles ganske subjektivt, så det er viktig å være klar på at det man sammenligner er størrelsesordenen, ikke den nøyaktige verdien.

### 5.1 MASSE-FJÆR-GENERATOR

Fordelen med et masse-fjær system er at det kan plasseres unna veien for andre hensyn, integrert i skroget, og det kan brukes både under transport og når man ligger i ro. Det har en, om enn liten, påvirkning på skipets bevegelser, men uten et godt regulerings og kontrollsystem kan den effekten like gjerne være negativ som positiv. Behovet for et godt kontrollsystem er en av ulempene med dette konseptet. Man ønsker å maksimere bevegelsesutslaget uten å overskyte de mekaniske grensene for systemet, i en irregulær bølgetilstand. Det stiller også krav til det elektriske systemet som må kunne både ta opp og avgi energi, ofte i store impulser, avhengig av hvilken fjærrespons og demperrespons man ønsker.

Den største ulempen er likevel at energimengden ikke ser ut til å være veldig stor. 200W for et system på 200kg (ikke medregnet vekten av rammeoppheng) med 2 meters utstrekning vil raskt bli for omfattende i forhold til hva man får igjen.

Man kan kanskje tenke seg betydelig tyngre løsninger som fungerer som substitutt til tradisjonell ballast, men det vil kreve en helt annen designtilnærming.

### 5.2 FOILGENERATOR

Dette konseptet ser ut til å ha det største energipotensialet. Bølger bærer på store krefter, og en nedsenket plate gir et godt ankerpunkt for å utveksle kreftene i energi. Ulempen er at det krever potensielt mye mekanikk, særlig hvis man skal bruke løsningen med utfelt arm. Det krever også en god løsning for å sette ut/ta inn riggen, spesielt dersom man har et system som ikke kan brukes under transit. Man kan i prinsippet tenke seg en foil-løsning som fungerer under transport også, men det er ikke evaluert i dette prosjektet.

Denne løsningen har også potensiale til å forbedre arbeidssituasjonen ombord ved å redusere bølgebevegelserne.

### 5.3 SOLCELLE

Hovedfordelen til solceller er at den optimale driftssonen er nesten ortogonal til alle de andre konseptene, som alle fungerer best i dårlig vær. Så lenge de er montert utenom arbeidssoner og støtsoner er de også veldig lite framtreddende. En totalløsning for et energisystem burde derfor sannsynligvis inkludere solceller.

En stor ulempe er at det er en lang vintersesong nesten uten sol der utbyttet er lavt, men siden været ofte er dårligere på den tiden, så de andre systemene vil ta over.

## 5.4 VINDMØLLE

Hovedfordelen til vindmøller er at dette er allerede et ferdig utviklet produkt som selges til vanlige forbrukere. Riktignok er markedssegmentet i stor grad seilbåter som har helt andre effektbehov enn det er snakk om på en arbeidsbåt, men en oppskalering av teknologien burde være uproblematisk.

Ulempen er at det vil være visuelt forstyrrende med en stor roterende masse over hodet. Det må settes av stor plass for montering, og kasting av isfragmenter utgjør en potensiell sikkerhetsrisiko.

En annen potensiell ulempe er at den muligens kun virkelig er nyttig når man ligger på tvers av vinden, seiler i medvind, eller krysser. Dersom man skal ligge i ro mot vinden eller kjøre rett mot vinden, noe man ofte vil gjøre, kan en vindmølle kunne ende opp som netto tap. Dette må eventuelt undersøkes nærmere.

## 5.5 KVANTITATIV SAMMENLIGNING

Som konseptkandidater for den kvantitative sammenligningen er det valgt ut følgende:

- Masse-Fjær-Demper
  - 200 kg svingvekt
  - 2 m svingebane
  - 1 m bølgehøyde med hovedperiode 2.5 s
- Foilgenerator
  - 2 m<sup>2</sup> plateareal
  - 5 m sidearm
  - 1 m bølgehøyde med hovedperiode 2.5 s
- Solcelle
  - 6 m<sup>2</sup> vertikalt panel og 4 m<sup>2</sup> horisontalt panel
- Vindmølle
  - 2 m diameter
  - Frisk bris 9.4 m/s

Disse kandidatene er på øyemål vurdert som "omtrent like omfattende", i noenlunde ekvivalente værforhold. Man kan sikkert diskutere tallene i hjel, men man må i hvert fall doble eller halvere størrelsen for at rangeringen skal endres nevneverdig.

Rangert etter effekt blir listen følgende:

1. Foilgenerator: ca. 1.0 kW
2. Vindmølle: ca. 0.5 kW
3. Masse-Fjær-generator: ca. 0.2 kW
4. Solcelle: ca. 0.1 kW (0.3 kW for sommertid, og 0.5 kW for dagtid om sommeren)

## 5.6 KONKLUSJON

Masse-fjær-generator ser ikke ut til å være en fruktbar vei å undersøke videre, i hvert fall ikke i den formen som er analysert her.

Vindmølle er en aktuell kandidat. Eksisterende teknologi med tilstrekkelig energipotensiale. Det må undersøkes hvorvidt den økte vindmotstanden utveier ekstraeffekten.

Solceller vil ikke kunne gi nok til å drive krafthydraulikk eller hovedframdrift, men kan muligens drive elektronikk og juksamaskiner på godværsdager om sommeren slik at man kan la motoren være av under fiske. Mer et HMS-tiltak enn et energiutvinningskonsept. Kan være verdt å ta med siden de stort sett kan installeres uten å være i veien for andre hensyn.

Foilgenerator vinner effektkonkurransen og er sånn sett verdt å undersøke nærmere. Krever at man løser de nevnte designutfordringene.



Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)