

# Frittstående bøyekonsept med fornybar strømtilførsel for subseainstallasjoner.

*Bachelor Maskin ingeniør, vår 2022*

Even Hansen Torgerhagen, Justin Maier, Thord Jevne

Gradering: Åpen

Bachelor i ingeniørfag - Maskin

Innlevert: Mai 2022

Veileder: Stergios Gouitanos

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

Fakultet for ingeniørvitenskap (IV)

Oppgavens tittel:  <b>Frittstående bøyekonsept med fornybar          strømtilførsel for subseainstallasjoner</b>	Dato: 19.05.2022		
	Antall sider: 70		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	<input checked="" type="checkbox"/>
Navn:  Even Hansen Torgerhagen, Justin Maier, Thord Jevne			
Veileder:  Stergios Gouitanos			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere:  Gudbrand Hammerstad, OneSubsea			

**Sammendrag:**

Målet med dette prosjektet har vært å undersøke muligheten for å utvikle et frittstående bøyekonsept med fornybar energi for undervannsinstallasjoner. Dersom konseptet realiseres vil oppdragsgiver, og eventuelt andre, spare midler og miljø. I dag løses problemet med undervannskabler fra oljerigger eller land, som leverer strøm og signaler.

For å håndtere problemstillingen har gruppen brukt en metode kalt «Divide and conquer», hvor vi deler problemet opp i mindre problemstillinger og tar tak i dem en etter en, før vi utvikler et konsept basert på løsningene til de enkelte problemområdene.

Vi har valgt å innhente litteratur fra relevante forskningsartikler funnet på internett, og kryssjekket eksterne aktører, for å validere litteraturens reliabilitet. Der det har vært behov for beregninger, har vi forsøkt å skaffe realistiske tall.

For å møte behovet for energi har gruppen sett på fornybare løsninger, inkludert bølgekraft, vindkraft og solkraft. Vi har gjennomgått hvordan de ulike teknologiene fungerer i prinsipp. Vi sammenlignet de forskjellige energikildene og endte opp med å gå for solenergi. For å optimalisere solenergi så vi også på optimalisering av arealet det dekket av bøyn og vinklingen av panelene.

Selve konseptet er også avhengig av å kunne være operativt på en dybde ned til 1000 meters under overflaten. Derfor er ulike metoder for forankring blitt utforsket, og gruppen kommet frem til en anbefaling som benytter prinsippet om oppdriftsanker.

Et annet viktig område av oppgaven har vært konseptets pålitelighet over lange perioder uten service. For å sikre at løsningen alltid er operativ, selv om det for eksempel er lengre perioder med lav solstråling, har gruppen også utforsket området for en type backup-løsning i form av batteri eller brenselcelle. Her konkluderte vi med at den beste løsningen ville være å bruke batteri for å holde løsningen fornybar og unngå bruk av fossilt brensel.

På slutten av rapporten har gruppen kommet med anbefalinger for videre arbeid.

Stikkord:

Fornybar energi; solcelle, vindkraft, bølgekraft
Bøye
Forankring
Subsea, subseainstallasjoner

# Forord

Denne rapporten er skrevet i emnet MASG2900 «Bacheloroppgave» fra utdanningslinjen maskiningeniør ved NTNU. Å utforske muligheten et «Frittstående bøyekonsept med fornybar strømtilførsel for subseainstallasjoner» er en skriftlig rapport, gjennomført og skrevet våren 2022 i samarbeid med OneSubsea. Oppgaven har vært tidskrevende og utfordrende, men har gitt alle gruppe-medlemmer mye innsikt i tidligere ukjente områder, og generelt vært veldig lærerikt.

Gruppen har vært nødt til å benytte seg av allerede tilegnet kunnskap fra tidligere fag i studiet som Dataassistert design og Parametrisk design, hvor spesielt kunnskap om simulering og CAD har vært nyttige. I tillegg har oppgaven utfordret gruppen på mange ukjente fagområder og til dels gått utenfor kjent pensum.

Gruppen ønsker å rette en stor takk til vår svært dyktige veileder Stergios Gouitanos for fremragende god veiledning, Arne Ilseng for viktig og god hjelp, Geir Arne Solheim fra Havkraft for veldig god innsikt i virkemåten av bølgekraft, Jørn Erik Norangshol fra Fugro for god informasjon om bøyeteknologi og Gudbrand Hammerstad som vår kontaktperson i OneSubsea for oppgaveveiledning og oppfølgingstimer.

*Even Hansen Torgerhagen*

---

Even Hansen Torgerhagen

*Justin Maier*

---

Justin Maier

*Thord Jevne*

---

Thord Jevne

# Abstract

The aim of this project has been to explore the possibility of developing a stand-alone buoy concept with renewable power supply for subsea installations. If the concept is realized, the client, and possibly others, will save funds and the environment. Today the problem is solved by subsea cables from oil rigs or land, that supply electricity and signals.

To tackle the issue the group has used a method called “Divide and Conquer”, where we divide the issue into smaller pieces and tackle them one by one, before we develop a concept based on the solutions to each issue.

We have chosen to obtain literature from relevant research articles found on the internet, and cross-checked this with people working in the field, to validate the literature's reliability. Where there has been a need for calculations, we have tried to obtain realistic numbers for our calculations.

To meet the need for energy, the group has looked at renewable solutions, including wave power, hydropower and solar power. We have reviewed how the different technologies work in principle. We then compared the different energy sources and ended up going for solar power. To optimize solar power, we also investigated optimization of the area it covered of the buoy and the angle.

The concept itself is also dependent on being able to be operational to a depth of 1000 meters below sea level. Therefore, different methods of anchoring have been explored, and the group would recommend a type of buoyancy anchor.

Another important area of the task has been the concept's reliability over long periods without service. To ensure that the solution is always operational, even if there are longer periods of low solar radiation, for example, the group has also explored the area for a type of backup solution in the form of a battery or fuel cell. Where we concluded the best solution would be to use battery to keep the solution renewable and avoid use of fossil fuels.

At the end of the report the group has made recommendations for further work to be done.

# Innholdsfortegnelse

Forord .....	v
Abstract .....	vi
Innholdsfortegnelse .....	vii
Figurliste.....	x
Tabelliste .....	xii
Symbolliste.....	xiii
1 Innledning.....	1
1.1 Motivasjon .....	1
1.2 Hensikten med oppgaven.....	1
1.3 Problemstilling.....	1
1.4 Omfang og begrensninger .....	2
1.5 Kravspesifikasjoner .....	2
1.5.1 Energibehov .....	3
1.6 FNs bærekraftsmål.....	4
1.7 Målgruppe for oppgaven .....	5
1.8 Resultatmål .....	5
1.9 Disposisjon .....	6
1.10 Intervju .....	7
2 Metode.....	8

2.1	Arbeidsprosess.....	8
2.2	Programvare.....	9
2.3	Veiledning .....	10
3	Teori .....	11
3.1	Valg av bøye.....	11
3.2	Energityper .....	11
3.2.1	Bølgekraft.....	11
3.2.2	Vindkraft .....	14
3.2.3	Solenergi.....	15
3.3	Simulering .....	17
3.3.1	Størrelse av solcellepanel .....	18
3.3.2	Vinkling av solcellepaneler .....	18
3.4	Reserveenergi .....	18
3.4.1	Brenselcelle .....	18
3.4.2	Batteri .....	20
3.5	Forankring .....	21
3.5.1	Kriterier for aktuelle løsninger .....	21
3.5.2	Metode 1: Flerpunktsforankring.....	22
3.5.3	Metode 2: Oppdriftsanker/S-line.....	23
3.5.4	Metode 3: Ettpunktsfeste med tung kontaktline.....	26
3.6	Kommunikasjon.....	27



4	Resultater.....	29
4.1	Simulering av solcellepaneler.....	29
4.1.1	Simulering av maksimalt areal.....	29
4.1.2	Optimalisering, vinkling av solcellepanel uten skygge.....	30
4.1.3	Optimalisering, vinkling solcellepanel med skygge.....	32
4.2	Energityper.....	33
4.2.1	Estimater av strømproduksjon.....	34
4.2.2	Sammenligning av de forskjellige energitypene.....	37
4.3	Reserveenergi.....	38
4.4	Forankring.....	39
4.5	Kommunikasjon.....	44
5	Diskusjon og analyse.....	45
5.1	Diskusjon rundt gjennomføring av oppgaven.....	45
5.2	Diskusjon av estimeringer og simuleringer.....	46
5.3	Diskusjon forankring.....	48
5.4	Diskusjon av konsept og løsning.....	49
5.5	Anbefaling for videre arbeid.....	50
6	Konklusjon.....	51
6.1	Digital modell.....	52
	Kildeliste.....	53

# Figurliste

Figur 1 FNs bærekraftsmål.....	4
Figur 2 Arbeidsprosess.....	9
Figur 3 Wave Star, prinsipp .....	12
Figur 4 Tverrsnitt av bølgekraft, prinsipp. Havkraft AS.....	13
Figur 5 Illustrasjon av bølge, sinuskurve .....	13
Figur 6 Illustrasjon av vindkraftverk prinsipp.....	14
Figur 7 Oppbygning av solcellepanel.....	16
Figur 8 Solcelle, prinsipp .....	17
Figur 9 Brenselcelle prinsipp, adaptasjon: <a href="https://snl.no/brenselcelle">https://snl.no/brenselcelle</a> .....	19
Figur 10 Batteri, prinsipp, adaptasjon: <a href="https://snl.no/batteri">https://snl.no/batteri</a> .....	20
Figur 11 Flerpunktsforankring illustrasjon .....	22
Figur 12 Flerpunktsfeste med kombinasjon av stram og halvstram line.....	23
Figur 13 Oppdriftsanker, illustrasjon .....	24
Figur 14 S-line, illustrasjon.....	25
Figur 15 Hel kjetting .....	26
Figur 16 Kjetting, kombinert.....	26
Figur 17 Ettpunktsfeste med tung line, illustrasjon.....	27
Figur 18 Optimal løsning, vist i Rhinoceros .....	30
Figur 19 Lokasjoner for innhenting av værdata .....	31

Figur 20 Soltimer per element, offshore Norge .....	31
Figur 21 Soltimer per element, Easter Island (nær Ekvator).....	31
Figur 22 Soltimer per element, Niulaktia (nær ekvator) .....	31
Figur 23 Soltimer per element, King George Island (nær Sør-polen).....	31
Figur 24 Optimalt resultat, King George Island, Rhinoceros .....	32
Figur 25 Optimalt resultat, med skygge, offshore Norge.....	32
Figur 26 Sum solstråling, offshore Norge .....	33
Figur 27 Sum solstråling, Easter Island (nær Ekvator) .....	33
Figur 28 Sum solstråling, Niulaktia (nær Ekvator) .....	33
Figur 29 Sum solstråling, King George Island (nær Sør-Polen).....	33
Figur 30 Sammenligning av energityper .....	37
Figur 31 Oppdriftsanker, illustrasjon .....	43
Figur 32 Ferdig digital illustrasjonsmodell 1 .....	52
Figur 33 Ferdig digital illustrasjonsmodell 2 .....	52

# Tabelliste

Tabell 1	Symbol, Definisjoner.....	xiii
Tabell 2	Forkortelser, Definisjoner.....	xiv
Tabell 3	Oversikt over interessenter.....	5
Tabell 4	Resultatmål.....	5
Tabell 5	Oversikt over intervjuobjekter og deres kompetanse.....	7
Tabell 6	De 5 mest arealeffektive parameterne.....	29
Tabell 7	Vurderingskriterier for flerpunktsanker.....	40
Tabell 8	Vurderingskriterier for oppdriftsanker.....	40
Tabell 9	Vurderingskriterier for ettpunktsfeste med kontakt/tung line.....	41
Tabell 10	Sammenligning og sum karakter for forankringsmetoder.....	42
Tabell 11	Sammenligning av breddegrad og simuleringresultat.....	47

# Symbolliste

Tabell 1

Symbol, definisjoner

Symbol	Definisjon	Enhet	Symbol	Definisjon	Enhet
P	Effekt over tid	kWh	$T_y$	tid per år	tid
$\rho$	massetetthet	$kg/m^3$	$v$	hastighet	m/s
H	høyde	m	$T_s$	soltimer	tid
b	bredde	m	$g$	gravitasjon	$m/s^2$
A	Areal	$m^2$ eller $cm^2$	$P_s$	solstråling	$W/m^2$
$\eta$	virkningsgrad		$P_{wave}$	energi i bølge	kW/m

Tabell 2

Forkortelse, definisjoner

Forkortelse	Definisjon
CAD	Computer Aided Design
EOM	Electro Optical Mechanical
NM	Nautisk mil
FV	Fotovoltaisk
Rhino	Rhinoceros (CAD- program)

Forkortelse	Definisjon
DC	Likestrøm
AC	Vekselstrøm
PLS	Programmerbar Logisk Styring
AIS	Automatisk identifikasjon system

# 1 Innledning

## 1.1 Motivasjon

Bruken av fornybarenergi står øverst på mange prioriteringslister. Det har vært enorme steg i effektivisering av fornybare ressurser de siste tiårene, som har gjort bruken av disse både mulig og rimelig. På bakgrunn av dette er denne oppgaven spennende for oss som studenter fordi det også byr på en mulighet for å utvikle et produkt som har en reell mulighet for å bli realisert. I tillegg kombinerer prosjektoppgaven kjente emner fra studieløpet som simulering, beregninger og digital utvikling, sammen med ukjente fagområder som marin teknikk og fornybar energi.

## 1.2 Hensikten med oppgaven

Hensikten med prosjektet er å undersøke om kostnaden for legging av strømkabler langs havbunnen fra f.eks. kysten eller nærliggende oljerigg/kraftstasjon kan begrenses. Derav ønsker oppdragsgiver å undersøke hvilken strømproduksjon dette krever. Deretter om dette kan sammensettes til en bøye som benytter seg av fornybare ressurser til å drifte et undervannsanlegg på havbunn. Selve undervannsanlegget har til hensikt å måle temperaturer, trykk, strømning i tillegg til at det åpner og lukker ventiler for å styre produksjon.

## 1.3 Problemstilling

Frittstående bøyekonsept med fornybar strømtilførsel for subseainstallasjoner. Denne bøyen må også kunne forankres på en trygg måte på ca. 1000 meters dybde. Systemet skal kunne driftes uten tilsyn i ett år og må derav dimensjoneres mtp. oppetid, redundans, tilkobling og i tillegg nok strømforsyning for drift av undervannsanlegget. Systemet skal benytte seg av allerede tilgjengelige, kommersielle og løsninger.

## 1.4 Omfang og begrensninger

Omfanget av prosjektoppgaven begrenser seg til å dimensjonere komponenter på bøyen ift. hvor mye strøm som må produseres og deres plassering mtp. effektivitet. Det skal benyttes fornybare energiressurser.

For en suksessfull gjennomføring av prosjektoppgaven er følgende begrensninger satt av gruppen, oppdragsgiver og veileder.

- Gruppen skal benytte seg av tilgjengelige, kommersielle komponenter og løsninger for å se om prosjektet er mulig å realisere.
- Et konsept skal utvikles slik at oppdragsgiver kan benytte seg av funnene for eventuell videre utforming til et ferdig produkt.
- Gruppen svarer på oppgavens mange utfordringer, men begrenser sitt hovedfokus til forankring og optimalisering av fornybar energi.
- Utforming av konseptet i digital form.

## 1.5 Kravspesifikasjoner

Underveis i prosjektets gang, har man kommet over flere krav man må sette til den endelige løsningen. Krav som er spesifisert av oppdragsgiver, se vedlegg 6, og krav som har dukket opp underveis fra gruppen.

**Driftssikkerhet:** Ettersom dette er en løsning langt ute på havet, og trolig også langt unna en oljeplattform eller lignende, hvor det normalt ikke vil være mennesker i umiddelbar nærhet, er det viktig at løsningen fungerer i lengre perioder, uten behov for vedlikehold eller tilsyn.

Dette kravet er satt til ett år av oppdragsgiver.

**Strømtilførsel:** Kabel med  $2.5\text{mm}^2$  tverrsnitt, og opptil 600V DC. Dette behovet skal dekkes av fornybar energi, og et batteri som sikrer hvis det skulle være overskyet/vindstille etc. avhengig av fornybar energi benyttet.



**Kabel og forankring:** Normalt kan det være ned til 1000 meter fra bøye og ned til undervannsanlegget. I tillegg nevnes det fra oppdragsgiver at forankring ofte er det svakeste ledd i en bøyeløsning (se vedlegg 6).

**Unngåelse av kollisjon:** Tiltak mot kollisjon.

**Produksjonskrav:** Ønskelig fra bedriftens side at det i størst mulig grad skal benyttes allerede etablerte komponenter og løsninger, som er kommersielt tilgjengelige.

**Vær og miljø:** Saltvann, store bølger og undervannsstrømmer er miljøfaktorer designet må ta hensyn til. Designet må tåle ekstreme påkjenninger uten å ta skade.

**Dimensjonering:** Løsningen må dimensjoneres ift. kommersielt tilgjengelig bøyer.

### 1.5.1 Energibehov

Siden subsea-anlegget benyttes for analyser, krever det noe strøm hele tiden for å være operativt. Det er normalt 3-4 sensorer per anlegg. Vi tar utgangspunkt i 4 for å overdimensjonere. I anlegget er det også PLS (Programmerbar Logisk Styring). Dette er enheten som behandler data inn fra sensorer, og gir videre aktuell informasjon. Disse er kontinuerlige laster som trekker strøm fra systemet hele tiden. Dette vil resultere i et forbruk på ca. 40W per time, og 350kWh per år. I tillegg til dette er det også et forbruk av energi når det trengs å utføres en mekanisk operasjon hvor det åpnes/lukkes en ventil. Dette forekommer oppimot 10 ganger per år for en modul, og selve operasjonen benytter 2kW i ett minutt. Dette igjen vil resultere i et årlig forbruk på ca. 3.334kWh.

Videre vil det også være noe forbruk i form av lys og kommunikasjon. En lyskilde som lyser 3-6.3NM, som også har AIS integrert, vil ha behov for opptil 8.3W per time, dette vil resultere i et årlig forbruk tilnærmet 73kWh (Automatic Power, 2019).

Totalt vil det derfor være et krav tilnærmet 430kWh per år for hele anlegget.

Dette er de overordnede kravspesifikasjonene for hele løsningen, det kommer spesifikke krav innenfor de forskjellige områdene.

## 1.6 FNs bærekraftsmål

Vår prosjektoppgave tar for seg flere av FNs bærekraftsmål. Under utdypes hvilke vi mener konseptet bidrar til.



*Figur 1 FNs bærekraftsmål*

- **Bærekrafts mål nr.7, Ren energi til alle:** Ved bruk av fornybar energi for å drifte undervannsanlegget møter oppgaven vår dette punktet. Konseptet skal ideelt kunne brukes for kommersielle aktører over hele verden og vil dermed kunne bidra til reduisering av utslipp.
- **Bærekrafts mål nr. 9, Industri, innovasjon og infrastruktur:** Ved innovasjon og utvikling av et konsept som ikke er i bruk allerede vil prosjektet kunne bidra til utvikling av marinindustrien.
- **Bærekrafts mål nr. 12 og 13, Ansvarlig forbruk og produksjon, Stoppe klimaendringene:** Produksjon skal være bærekraftig og bruk av fornybare ressurser bidrar til dette og kan i tillegg redusere utslipp.
- **Bærekrafts mål nr. 14, Livet i havet:** Tidligere metoder for strømtilførsel av undervannsanlegg har benyttet seg av å legge strømkabler langs havbunnen fra en strømkilde som f.eks. en oljerigg i nærheten eller fra land. Sett bort ifra de enorme kostnadene dette medbringer kan dette også forstyrre økosystemer på havbunn, noe som blir betraktelig redusert med dette konseptet.
- **Bærekrafts mål nr. 17, Samarbeid for å nå målene:** Internasjonalt samarbeid er viktig, og enda viktigere for oss er et norsk produkt som bidrar stort på det globale markedet.

## 1.7 Målgruppe for oppgaven

Tabell 3

Oversikt over interessenter

Interessenter	Primær/sekundær	Kommentar
OneSubsea	Primær	Støttespiller og utgiver av prosjektoppgaven
Stergios Gouitanos	Sekundær	Veileder
Studenter	Sekundær	Mulig bruk i videre studie

Oppgaven skrives i samråd med OneSubsea, som i stor grad er interessert i konklusjonen av prosjektet vårt som ideelt skal kunne realiseres ut ifra konseptet vi utvikler, og videre brukes i et marked som har bruk for et slikt produkt. Det er en stor fordel at vår veileder kan tilføre mye kunnskap innenfor simulering.

## 1.8 Resultatmål

Tabell 4

Resultatmål

1	En analyse av muligheter innfor fornybare ressurser og batteribruk i bøyen. Identifisering av mest egnede komponenter og løsninger for prosjektet ift. krav som må overholdes, utgitt fra oppdragsgiver.
2	Utvikling av en simuleringsmodell som beregner nødvendig vinkel og størrelse på solcellepaneler.

3	Utvikling og sammensetning av et bøyekonsept som dekker alle kravene satt av oppdragsgiver.
4	Fullføre hele prosjektrapporten og utforming av en illustrasjonsmodell i digital form i løpet av 19 uker.

## 1.9 Disposisjon

Kapittel 1 innleder rapporten med bakgrunnsinformasjon for å forberede leseren på hva som kan forventes.

Kapittel 2 gir et overblikk over metodene som er brukt, og hvordan gruppen har gått fram med informasjonsinnhenting.

Kapittel 3 er en gjennomgang av alle mulige komponenter og løsninger samt en presentasjon av nødvendig teori for komponentene.

Kapittel 4 presenterer resultatene i form av beregninger for å dimensjonere og gi en anbefaling for valg av komponenter og løsninger.

Kapittel 5 diskuterer gjennomføringen av oppgaven og utfordringer som er møtt under prosjektoppgaven, de utførte simuleringene, løsningene som er benyttet og en anbefaling for videre arbeid.

Til slutt oppsummeres funnene fra resultatene i konklusjonen i kapittel 6.

## 1.10 Intervju

Tabell 5

Oversikt over intervjuobjekter og deres kompetanse.

Intervjuobjekt	Stilling/funksjon	Kompetanse
Stergios Gouitanos	Veileder	Simulering/Beregninger
Gudbrand Hammerstad	Kontaktperson i OneSubsea	Olje/gass
Geir Arne Solheim	CEO Havkraft, intervju	Bølgekraft
Arne Ilseng	Professor ved NTNU/rådgiving	Ph.D Computational Mechanics (2016), MSc Mechanical Engineering (2013)
Jørn Erik Norangshol	Service Line Director Fugro, intervju	Bøye teknologi

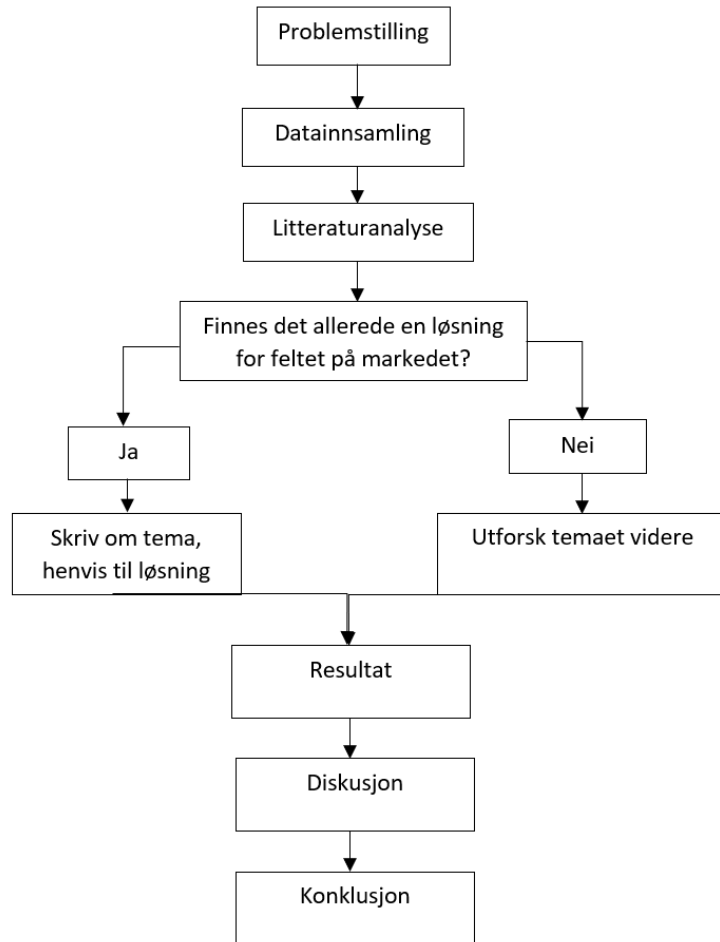
## 2 Metode

I dette kapitlet blir fremgangsmåten som ble benyttet i arbeidsprosessen beskrevet, hvilke programmer som blir benyttet, i tillegg til hvordan vi har benyttet veiledning underveis i prosessen.

### 2.1 Arbeidsprosess

I arbeidet med oppgavens problemstilling er flere metoder benyttet. En av de første metodene gruppen har benyttet var å bryte ned problemstilling i mindre problemer, en såkalt “Divide-and-conquer algorithm”-metode (Wikipedia, 2022). I stedet for å prøve å finne en eksakt løsning som dekker hele problemstillingen, kan man oppsøke informasjon om de enkelte områdene. For å avdekke om dette er noe som løses med etablerte ting på markedet, eller om det er noe man må finne en ny løsning for. Når man har funnet løsninger for de enkelte områdene, prøver man å kombinere disse sammen til en helhetlig løsning.

En stor del av det som ble gjort i starten av prosjektet baserte seg på litteraturstudier. Her har vi oppsøkt forskjellige kilder for å avdekke informasjon om de forskjellige teknologiene man kan benytte seg av for å løse problemstillingen. Litteraturen er hentet både fra norske og internasjonale kilder. I figur 2 er arbeidsprosessen illustrert.



*Figur 2 Arbeidsprosess*

I praksis er ikke veien til diskusjon og konklusjon rett frem, stegene går litt mer om hverandre, og det er litt vanskelig å definere en start og en slutt på hvert enkelt steg. Det er en iterativ prosess, som vil si at man hele tiden går tilbake til tidligere steg hvis man kommer over problemer eller nye ideer.

## 2.2 Programvare

**Solidworks** har blitt benyttet i flere av de obligatoriske emnene vi har vært igjennom, for å nevne noen: dataassistert design, produksjonsmetoder, elementmetoden m.m. Dette er et CAD-program, som benyttes både for å bygge opp 3D-modeller og å gjøre analyser.

**Rhinoceros 3D** har blitt benyttet underveis i vårt bachelorstudium i et valgemne kalt Parametrisk Design. Bruksområdet til dette programmet kontra andre CAD-programmer er at

man kan enkelt endre på parameterne til modellen etter man har fått frem ønsket geometri. Programvaren har også mange utvidelser som eksterne interessenter har programmert, såkalte «plugins», for å utvide bruksområdet til programvaren. Her har vi da benyttet en plugin kalt Ladybug, som gir tilgang til værdata. Vi har også benyttet en plugin kalt Galapagos, som hjelper oss med selve optimaliseringen. Denne pluginen gjør det mulig å gi programvaren tilgang til forskjellige parametere som den kan endre fritt, for å f.eks. be den maksimere antall soltimer.

## **2.3 Veiledning**

Gjennom prosjektet har vi hatt kommunikasjon med vår veileder fra NTNU og vår veileder for prosjektet fra oppdragsgiver. Møtene og kommunikasjonen har foregått fysisk, via Teams og via e-post. Vi har underveis kontaktet flere eksterne leverandører, for å få til et samarbeid med dem. I disse møtene har vi lagt frem formålet med prosjektet, muligheten for at dette skal realiseres, og om eventuelt OneSubsea vil være ute etter en leverandør av deres aktuelle løsning. Gruppen har benyttet en kvalitativ metode over en kvantitativ, da vi ønsket oppnå kontakt med personer som er eksperter på sitt fagområde.



# 3 Teori

## 3.1 Valg av bøye

Etter som konseptet vårt skal basere seg på allerede tilgjengelige komponenter, er basen for bøyen vår ikke et unntak. Etter henvisning fra OneSubsea kom vi til bedriften «Fugro». Fugro spesialiserte seg innenfor bøyeteknologi, hvor «Fugro SEAWATCH Wind lidar Bouy» har blitt valgt som utgangspunkt for videre utvikling og design i konseptet vårt (Hammerstad, Gudbrand. OneSubsea/Veileder. Digitalt informasjonsmøtemøte, 11.01.22). Denne bøyen har en diameter på 3m. Fugro produserer også andre bøyer til diverse applikasjoner i ulike dimensjoner. Disse bygges i størrelser med diameter på 1.1m og 1.8m (Norangshol, Jørn Erik. Fugro/Service Line Director. Digitalt møte/intervju, 26.04.22), til vårt formål vil disse ikke være store nok, derav havnet valget på «Fugro SEAWATCH Wind lidar Bouy».

## 3.2 Energityper

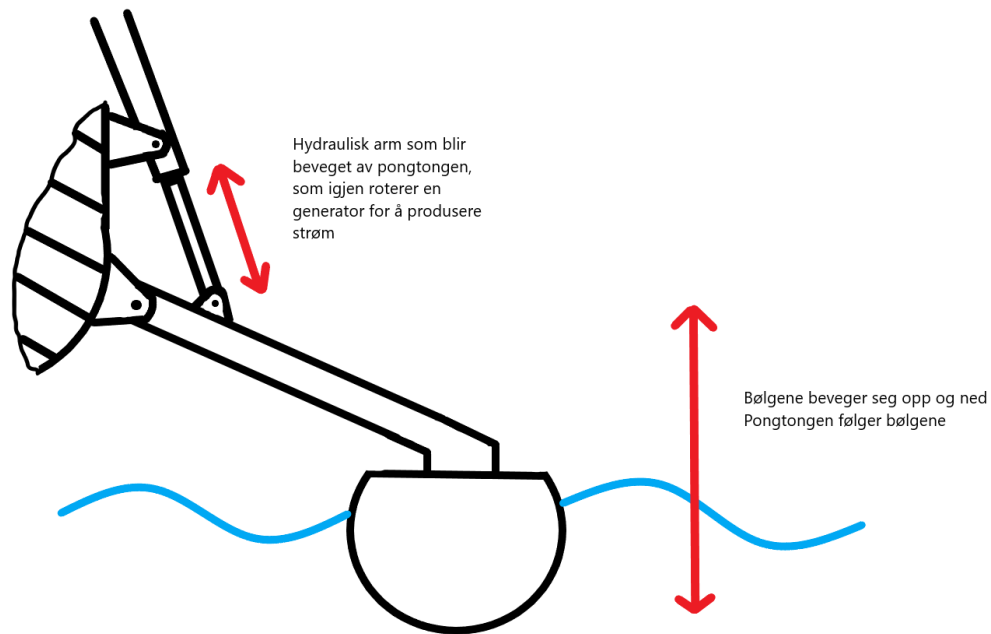
I dette kapitlet går vi igjennom materialet vi har samlet inn om de forskjellige energitypene vi kan benytte. Energitypene som omtales er vann, sol og bølge.

### 3.2.1 Bølgekraft

«Gjennom årene har det vært lansert en rekke ideer og patenterte metoder for utnyttelse av bølgeenergi. I mange land arbeides det med forsøksanlegg av ulike typer og prinsipper. Ved alle bølgekraftsystemene som er under utprøving, er en del både konstruksjonsmessige og driftsmessige problemer ennå ikke løst» (Rosvold, 2022).

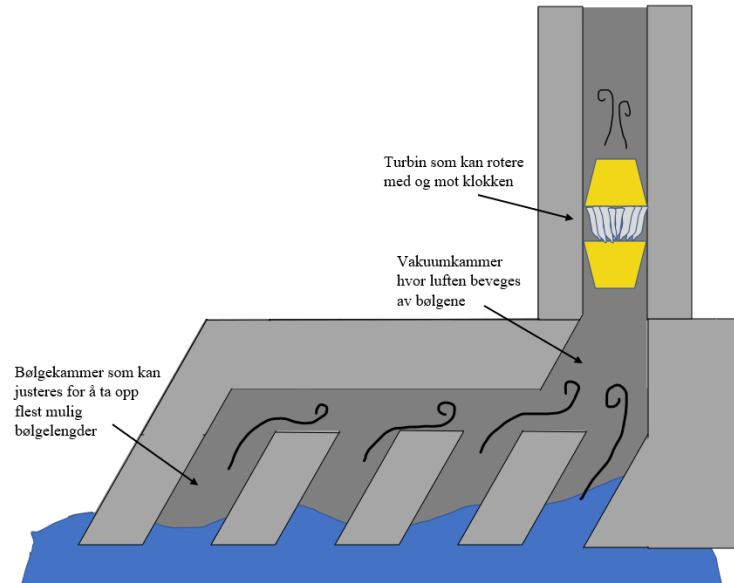
«Det gjelder f.eks. det ambisiøse Wave Star, der store pongtonger beveget seg opp og ned i takt med bølgene, og på den måten tappet dem for energi. Etter noen års utprøving ble et stort testanlegg ved Hanstholm skrotet sommeren 2016, og tross EU-støtte på 20 millioner euro var det ikke nok til et større anlegg.» (Nygaard, 2016).

Wave Star er altså et bølgekraftverk i storskala. Dette er store anlegg som er plassert ute på havet, hvor selve produksjon av strøm skjer ved havoverflaten, og anlegget står stasjonært med søyler som går helt ned til havbunn. Prinsippet bak Wave Star sin løsning er vist i figur 3.



*Figur 3 Wave Star, prinsipp*

Igjennom vårt intervju med Havkraft AS fikk vi introdusert metoden de benyttet for å skape strøm. I prinsippet er det ganske enkelt, et kammer ligger i bølgene, luften presses opp når bølgene stiger og skaper trykk. Luften presses igjennom en turbin som genererer mekanisk energi. Når bølgene synker dras luften ned igjen vha. vakuum og turbinen beveger seg i motsatt retning. Prinsippet er fremstilt via figur 4.

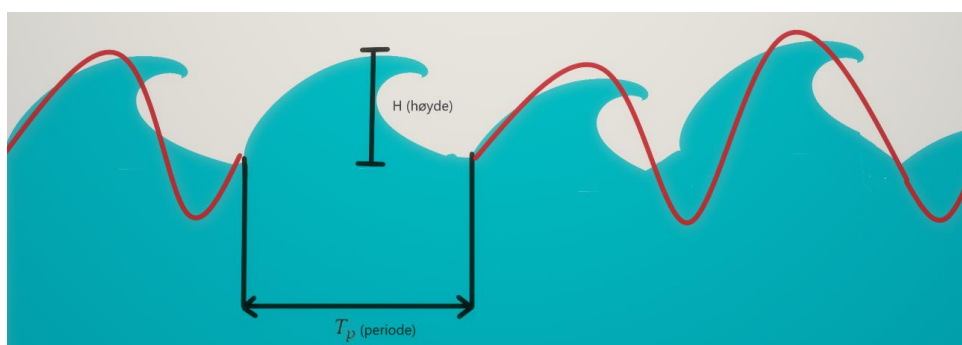


Figur 4 Tverrsnitt av bølgekraft, prinsipp. Havkraft AS

Det viktige for dette prosjektet vil være å produsere nok strøm til å drifte undervannsanlegget. Derfor har vi nedenfor sett på de forskjellige formlene som er aktuelle å benytte (Wikipedia, 2022).

$$(1) P_{Wave} = \frac{\rho g^2}{64 \pi} H^2 T_p$$

Hvor  $P_{Wave}$  gir oss watt/meter.  $\rho$  er massetettheten til vann ( $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  er gravitasjonskraft ( $\approx 9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $\pi \approx 3.14$ .  $H$  er høyden på bølgen fra bunn til topp [m].  $T_p$  er perioden mellom bølgetoppene [s].



Figur 5 Illustrasjon av bølge, sinuskurve

Formel 1 gir oss den kinetiske energien til bølgene. Tallet man finner ut ifra denne formelen tar man med videre til formel 2.

$$(2) P = P_{Wave} b \eta T_y$$

Hvor  $P$  gir oss antall kWh produsert over en gitt periode.  $P_{Wave}$  [kW/m] er et beregnet tall for hvor mye kinetisk energi bølgen innehar.  $b$  er bredden på bølgekraft-anlegget i meter.  $\eta$  er virkningsgraden til anlegget.  $T_y$  er tidsperioden i antall timer.

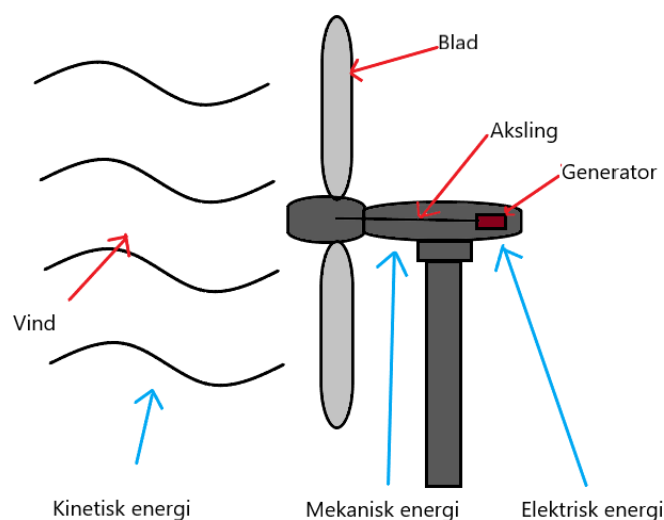
Setter man formlene 1 og 2 sammen får man en komplett formel som gir oss tallene vi er ute etter, og om dette dekker vårt behov av strømproduksjon.

$$(3) P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T_p b \eta T_y$$

Resultatet av denne beregningen vil bli gjennomgått i kapittel 4.

### 3.2.2 Vindkraft

«Vindkraft er et kraftverk som kan omforme vindenergi til elektrisk energi. Et vindkraftverk kalles også vindkraftstasjon, og mer upresist også vindmølle» (Hofstad, 2019). Et vindkraftverk består av en vindturbin med som oftest tre turbinblader på en horisontal akse. Turbinbladene roterer i et plan loddrett på vindretningen. Turbinen i seg selv benytter denne rotasjonen for å produsere strøm. Det finnes også vindkraftverk som er bygd opp rundt en vertikal akse. Figur 6 illustrerer prinsippet til en vindmølle.



Figur 6 Illustrasjon av vindkraftverk prinsipp

En vindturbin har en teoretisk maksimal virkningsgrad på 59.3%, funnet av en tysk fysiker kalt Albert Betz i 1919 (Donev, 2018). Som vil si at 59.3% av den kinetiske energien i vinden kan tas opp i turbinen og derav generere energi. De fleste vindturbiner i dag ligger på en virkningsgrad mellom 35%-45% (EDF, 2020).

Den globale median vindhastigheten målt av bøyer ute på havet var i 2000 målt til 6.64m/s i en høyde på 10meter over havets overflate (Stanford, 2000).

Formel 4 som gir oss totalt produsert kWh per år av en vindturbin (Wikipedia, 2022).

$$(4) P = \frac{1}{2000} A \rho v^3 \eta T_y$$

Hvor A er arealet av området bladene til vindturbinen dekker [ $m^2$ ].  $\rho$  er massetettheten til luft ( $\approx 1.23 \text{ kg}/m^3$ ).  $v$  er hastigheten til vinden ( $\approx 6.64\text{m/s}$ ).  $\eta$  er virkningsgraden til vindkraftverket (som nevnt over  $\approx 35\% - 45\%$ ).  $T_y$  er antallet timer i året.

Resultatet av denne beregningen vil bli gjennomgått i kapittel 4.

### 3.2.3 Solenergi

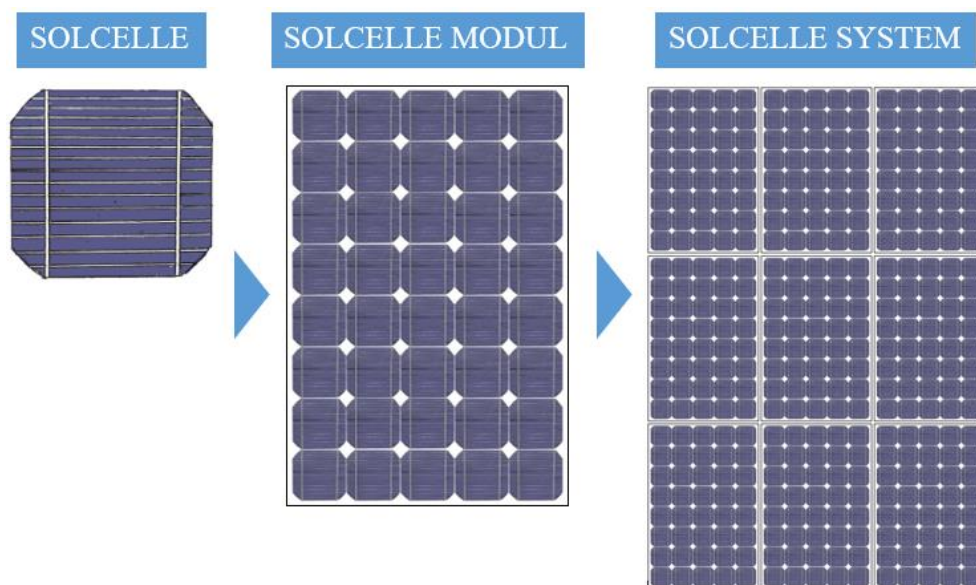
Utgangspunktet for vår problemstilling er om man kan drifte et undervannsanlegg ved bruk av fornybare kilder man finner på havet. Solenergi kan høstes på flere forskjellige måter, oftest ved bruk av 2-3 spesifikke metoder, hvorav bruk av stråling og selve lyset fra solen til å produsere elektrisitet gjennom solceller er den mest aktuelle metoden for denne oppgaven. Det blir da benyttet et lite anlegg med flere solcellemoduler, koblet sammen til et system og tilknyttet batteri.

#### Grunnleggende om solceller:

Fotovoltaisk «FV» teknologi benytter FV-materialer og enheter for å konvertere sollys om til elektrisk energi. For at disse FV-cellene skal produsere større mengder med strøm blir de koblet sammen til kjeder som danner større enheter med mange celler, mest kjent som moduler eller paneler. Disse modulene kan benyttes enten individuelt, eller kan kobles sammen i rekker på samme måte som de individuelle cellene. Herfra vil modulen, eller

eventuelt rekkene med moduler, kobles på et elektrisk nettverk som en del av ett komplett fotovoltaisk system. (energy.gov, 2022)

Fordelen med måten FV-systemer er bygget opp på er at de er basert på moduler. Dermed kan vi skreddersy løsninger for å imøtekomme de faktiske strømkravene, noe som er svært gunstig i vårt tilfelle.

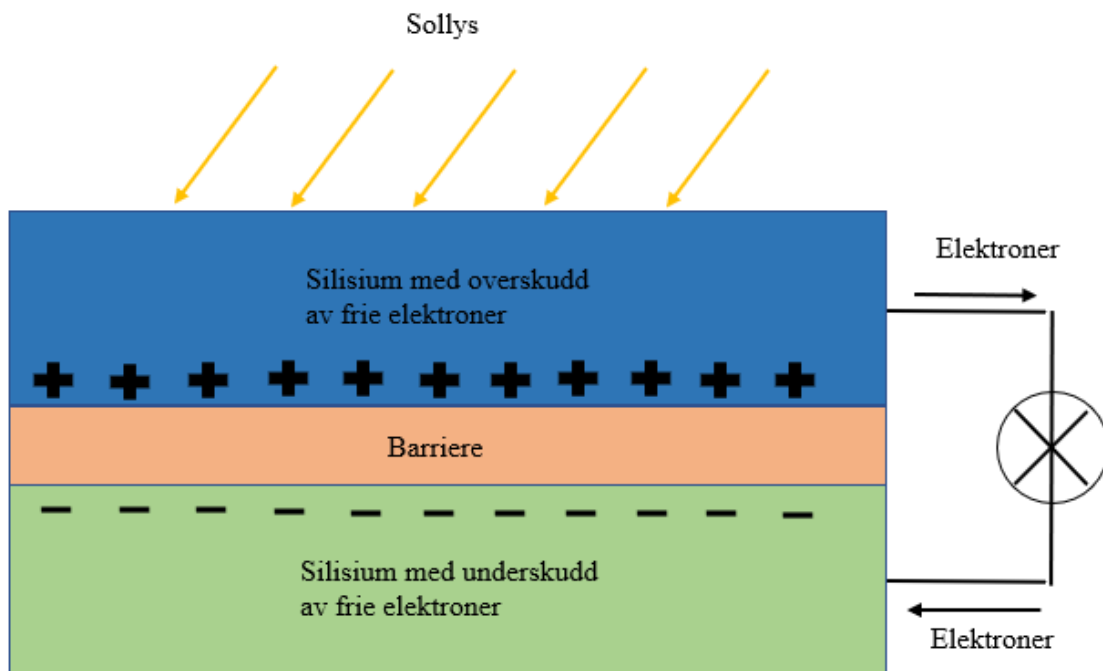


*Figur 7 Oppbygning av solcellepanel*

### **Hvordan en solcelle fungerer:**

Solceller inneholder et materiale som fungerer som en leder for elektrisitet, men kun når energi blir tilført – herav ved eksponering for sollys. Det benyttes et halvledende materiale, som betyr at dets elektriske ledningsevne er mindre enn ved et metall, men mer enn en isolator. En isolator er en gjenstand som med svært liten ledningsevne, ofte brukt for å forhindre strømgjennomgang.

Når et halvledende materiale blir eksponert for sollys, absorberes dette lyset av cellene og blir overført til energi ved at elektroner flyter gjennom det halvledende materiale som en elektrisk strøm, se figur 8. Dette er pga. at andre lag med FV celler i et panel er designet slik at de skal uthente elektrisitet fra halvlederne. Deretter flyter strømmen av elektrisitet gjennom metallkontakter, disse kontaktene er den rutenettlignende strukturen, figur 7.



Figur 8 Solcelle, prinsipp

### Formel for beregning av energi

$$(5) P = \frac{T_s P_s A \eta T_y}{1000}$$

Hvor  $P$  står for strøm per år [kWh].  $T_s$  står for gjennomsnittlig sol per dag [timer].  $P_s$  står for gjennomsnittlig solkraft [ $W/m^2$ ].  $A$  står for areal av solpanel [ $m^2$ ].  $\eta$  står for virkningsgrad/effektivitet.  $T_y$  står for tid per år, i antall dager (365).

Resultatet av denne beregningen vil bli gjennomgått i kapittel 4.

## 3.3 Simulering

For å optimalisere arealet solcellepanelene benytter, og vinklingen av de har gruppen utført simuleringer i Rhinoceros.

### **3.3.1 Størrelse av solcellepanel**

Solkraft, eller solstråling, måles i  $W/m^2$ . Med utgangspunkt i denne benevningen kan man se at en avgjørende parameter for effekten man får ut av et solcellepanel, er totalt areal det dekker. For å finne den optimale sammensetning av høyde, bredde og antall som passer innenfor de gitte dimensjoner. Her har vi gitt Rhino tilgang til parameterne som styrer høyde, bredde og antall for å finne det maksimale oppnåelige arealet.

### **3.3.2 Vinkling av solcellepaneler**

Produksjon av energi via solcellepaneler avhenger av mange faktorer, blant disse er vinkling av solcellepanelene. Vinkling vil være avhengig av hvor man befinner seg i verden, årstid m.m. I et forsøk gjort i Malaysia hvor de fant maksimal effekt ut av et solcellepanel til å være 57W. Her fant de at for hver  $5^\circ$  solcellepanelet tiltes bort fra optimal vinkel, reduserer effekten med 3.45W (Mamun, Islam, Hasanuzzaman, 2022). Dette tilsvarer et effekttap på tilnærmet 6%.

Her vil vi bruke Rhinos styrke til å styre parametere, for å maksimere en gitt variabel. Her vil vi gi den kontroll over vinkelen til solcellene, for å maksimere antall soltimer.

Resultatene av disse simuleringen vil bli gjennomgått i kapittel 4.

## **3.4 Reserveenergi**

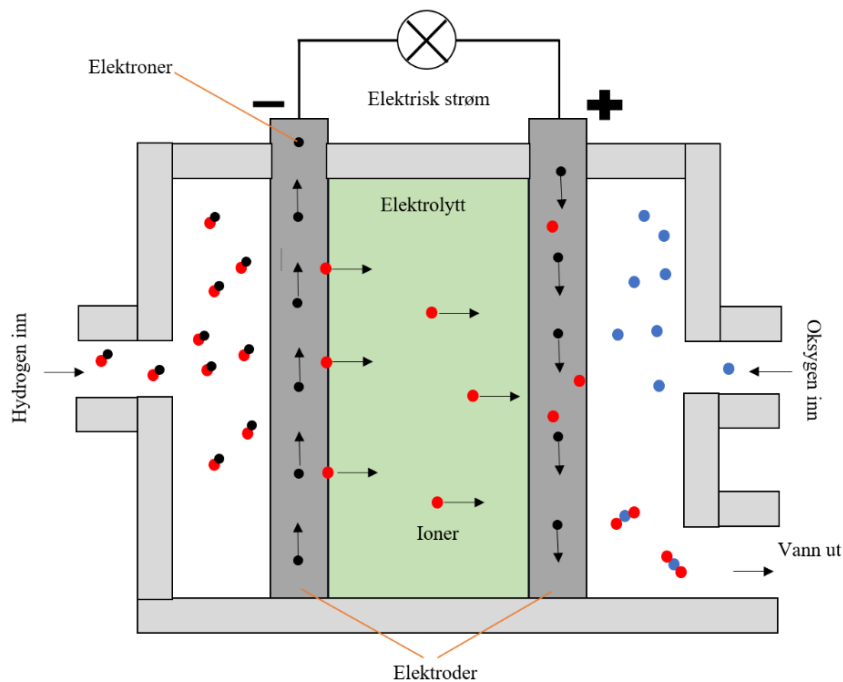
### **3.4.1 Brenselcelle**

For dager hvor det er vindstille eller veldig overskyet lønner det seg å ha reserveløsning i tilfellet batterikapasiteten er for lav for at undervannsinstallasjonen kan få utført sine oppgaver. Mange produsenter av bøyer har tenkt på dette, slik som «Fugro SEAWATCH Wind lidar Bouy». Denne bøyen som konseptet vårt baserer seg på, er nødt til ha en form for reserve når batteriene og solcellepanelene ikke strekker til (Norangshol, Jørn Erik. Fugro/Service Line Director. Digitalt møte/intervju, 26.04.22).



## Brenselcellenes virkemåte

Brenselceller bruker gjerne hydrogen, etanol, karbon eller tyngre karbonforbindelser til å produsere strøm. I f.eks. hydrogenceller blir hydrogen og oksygen pumpet inn fra hver sin side inn i et kammer med elektroder hvor begge stoffene ioniseres slik at elektroner skal kunne flytte seg gjennom en elektrodene. Deretter flytter de positive hydrogenionene seg gjennom elektrolytten mot de negative oksygenionene (Haarberg, Pedersen, Holtebekk, 2021). Denne prosessen skaper elektrisitet, og vann som utslipp.



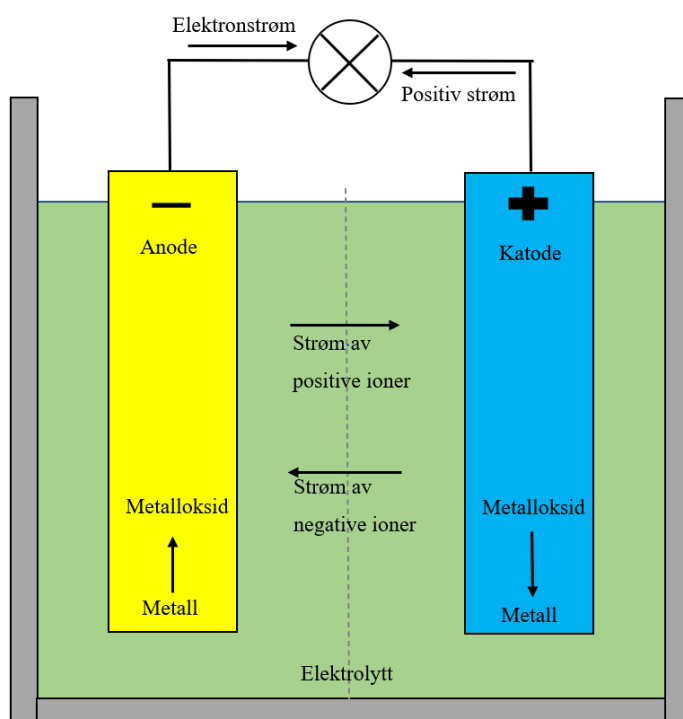
Figur 9 Brenselcelle prinsipp, adaptasjon: <https://snl.no/brenselcelle>

Det finnes flere fordeler med bruk av brenselceller. Først og fremst kan brenselceller produsere mye strøm ift. egenvekt og størrelse, i og med at de kan bygges mye mindre enn konvensjonelle forbrenningsmotorer med samme effekt. I tillegg er brenselceller mer effektive ift. f.eks. et dieselaggregat med en virkningsgrad på omtrent 50 til 60% (Haarberg, Pedersen, Holtebekk, 2021) mot ca. 45% fra dieselmotorer (virkningsgrad, 2022). Brenselceller har en stor fordel ovenfor dieselaggregat, ved rent utslipp er det bare vann som produseres ift. CO<sub>2</sub> fra diesel, hvis man ikke tar hensyn til produksjonen av drivstoffene.

### 3.4.2 Batteri

Bøyen er avhengig av å bruke et batteri som kan lagre overskudd av elektrisk energi som produseres på bøyen. Denne energien kan brukes når f.eks. solceller eller vindturbiner ikke klarer å produsere nok strøm under overskyede eller vindstille dager. I mange bøyer brukes det brenselceller for å legge til elektrisitet ved akutt mangel fra de fornybare energikildene.

Det finnes mange ulike typer batterier. De mest moderne batteritypene som brukes bl.a. i biler og smarttelefoner er litium-ion-batterier. Disse produseres gjerne i størrelser på f.eks. 3.8V i telefoner, eller 12V, 24V, 48V opp til 400V og 800V i elbiler (Klingenberg, M., Valle, M., 2021).



Figur 10 Batteri, prinsipp, adaptasjon: <https://snl.no/batteri>

I oppbygning er batteriene grunnleggende like. Batteriene har en positiv katode og en negativ anode hvor begge ligger i en elektrolytt. Anoden oksyderer og katoden reduseres.

Oksydasjonen gjør at det frigjøres elektroner slik at anoden blir negativt ladet og katoden får en positiv spenning. Denne forskjellen i spenning gjør at det skapes flyt av elektroner og derav elektrisitet (Haarberg, 2021).

Fordelen med høyere spenning er at batteriene kan levere høyere effekt og at strømkabelen kan minskes. Dobling i spenning betyr halvering i kabeltverrsnitt. Dette er hovedforskjellen

mellom 400V og 800V batterier i biler i tillegg til at 800V arkitektur kan lades opp kjappere med mindre varmegang. Mellom 12V, 24V og 48V skiller det hvor mye plass batteriet tar. 24V og 48V batterier kan bygges i mindre størrelser enn 12V, men er derimot dyrere å produsere.

## 3.5 Forankring

I dette kapittelet vil vi gå inn på aktuelle løsninger for forankring av selve bøyen. Vi har derfor valgt å belyse et utvalg av aktuelle metoder som kan benyttes i vår situasjon, og utforske disse.

### 3.5.1 Kriterier for aktuelle løsninger

Det finnes svært mange varianter når det kommer til forankring av bøyer, men det er i hovedsak to prinsipper som går igjen i de fleste variantene. Det første prinsippet er kjent som «kontaktfortøyning» og går hovedsakelig ut på at fortøyningen ligger på eller har kontakt med havbunnen. Det andre prinsippet er «stram fortøyning» hvor det vil være en stram forankringsline, som ikke er i kontakt med havbunnen.

De forskjellige variantene vil variere ettersom hva man ønsker å oppnå og f.eks. hvor dypt forankringen skal foregå. For å gjøre det enklere å gjøre rede for mulig valg løsning av forankring har vi valgt å fokusere kravspesifikasjonene til forankring ned til fire kritiske faktorer for suksess. Disse vil gjøre det enklere å vurdere metodene opp mot hverandre.

Følgende kriterier for suksess er:

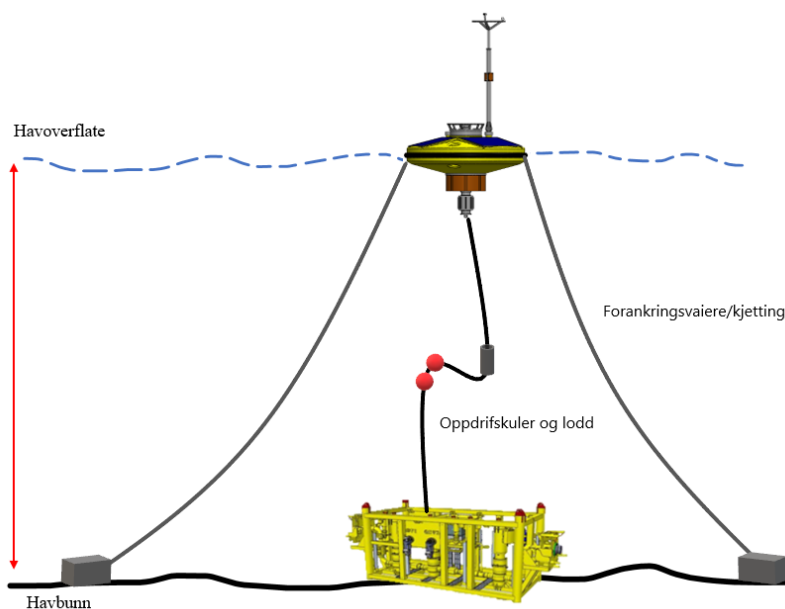
- **Slitasje på strømkabelen:** At bøyen ikke har for mye ukontrollerte bevegelser, slik at kabelen som skal henge ned fra bøyen og til undervannsanlegget får skader som f.eks. knekk eller avrivning.
- **Kompleksitet:** Kompleksitet og kostnadseffektivitet for forankringsmetoden.
- **Dybde:** Om metoden er aktuell for den dybden vi skal operere på.
- **Krefter på selve forankringen:** Om forankringsmetoden vil tåle de kreftene som den vil bli utsatt for på havet.

Resultatene av karaktergivingen med begrunnelse blir presentert i kapittel 4.

### 3.5.2 Metode 1: Flerpunktsforankring

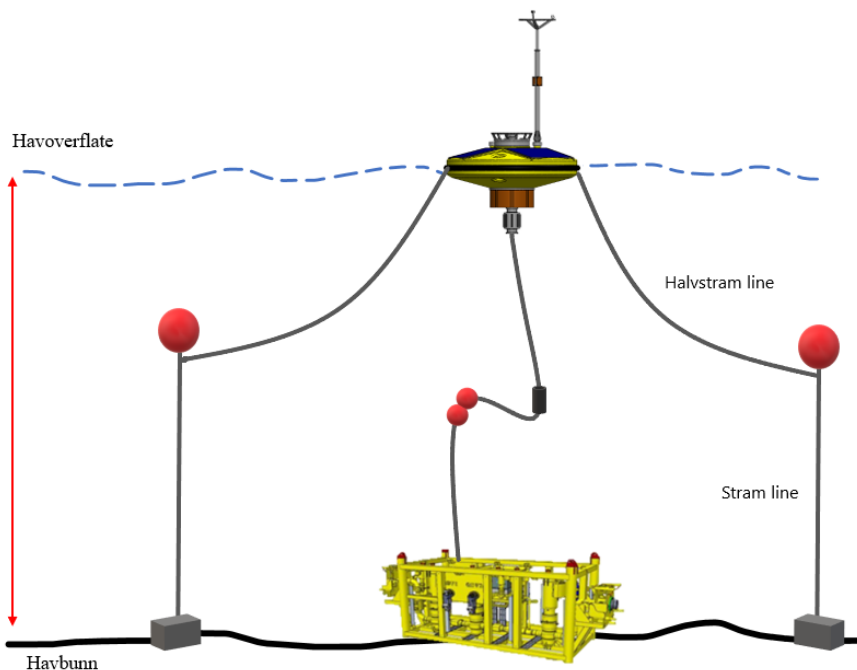
Denne festemetoden bygger på prinsippet om å ha flere forankringspunkter for å holde bøyen i ro. Det finnes flere forskjellige varianter av denne metoden, som bygger både på prinsippet om «kontaktfortøyning» samt «stram fortøyning». Et aktuelt tilfelle er vist på figur 11. Her festes det oppdriftskuler og lodd på seksjoner av en strømførende kabel som sørger for at kabelen delvis går rett opp mot overflaten («halvstram fortøyning»). Selve forankringen består av en stram fortøyning av sterke vaier, kjetting eller en kombinasjon av både vaier og kjetting. Andre elastiske materialer blir også benyttet, som oftest polyester, polypropylen og nylon, avhengig av dybden det skal forankres.

Hovedelementet i denne forankringsmetoden er to eller flere forankringspunkter. Avhengig av hvor stabil bøyen behøver å være kan man legge til mange festepunkter i sirkel rundt slik at bøyen blir helt spent fast. Dette vil i hovedsak utgjøre en stor forskjell på bl.a. stabiliteten til bøyen og føre til mindre eller ingen muligheter for at bøyen kan drifte i sirkel som den normalt vil gjøre ved ettpunktsforankring.



Figur 11 Flerpunktsforankring illustrasjon

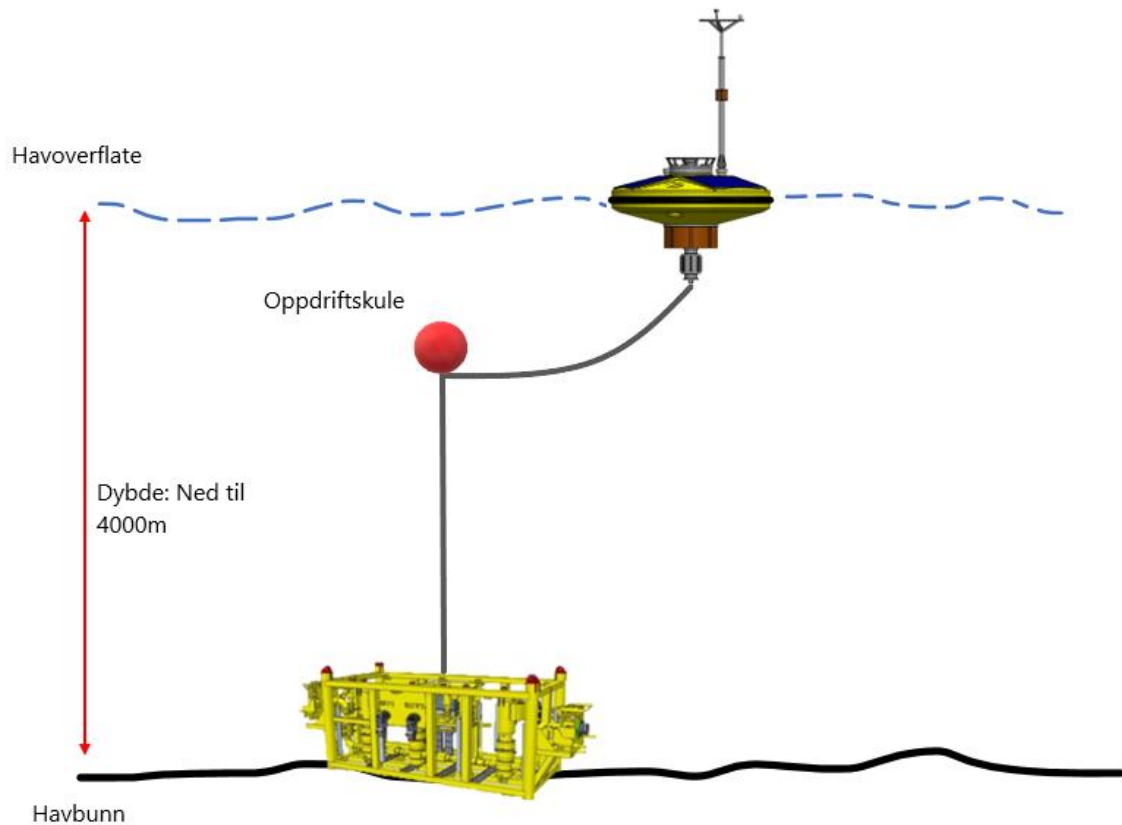
En annen kombinasjon av flerpunktsfeste er ved bruk av en kombinasjon mellom stram og halvstram line. Dette får man til ved bruk av oppdriftsankere som gir et nytt forankringspunkt nærmere overflaten, for så å benytte en «halvstram line» herfra og til bøyen som er illustrert på figur 12.



*Figur 12 Flerpunktsfeste med kombinasjon av stram og halvstram line*

### 3.5.3 Metode 2: Oppdriftsanker/S-line

Oppdriftsanker er en forankringsmetode som bygger på prinsippet om «stram fortøyning» og ett forankringspunkt. Ved bruk av lodd og oppdriftskuler korrigeres forankringslinens bevegelser. Oppdriftskulene skaper et høyere forankringspunkt pga. trykket inne i kulene vil opp til overflaten og derfor drar linen rett opp fra forankringspunktet på havbunnen. Dette refereres ofte til som en «falsk havbunn» (Norangshol, Jørn Erik. Fugro/Service Line Director. Digitalt møte/intervju, 26.04.22). Oppdriftskulene under vann blir som en ny havbunn, mellom overflaten og den faktiske havbunn. Herfra kan man forankre med «halvstram line» opp til bøyen igjen. Dette er en egnet metode for svært dype situasjoner hvor man ved bruk at dette prinsippet kan «flytte» havbunnen nærmere overflaten, figur 13.



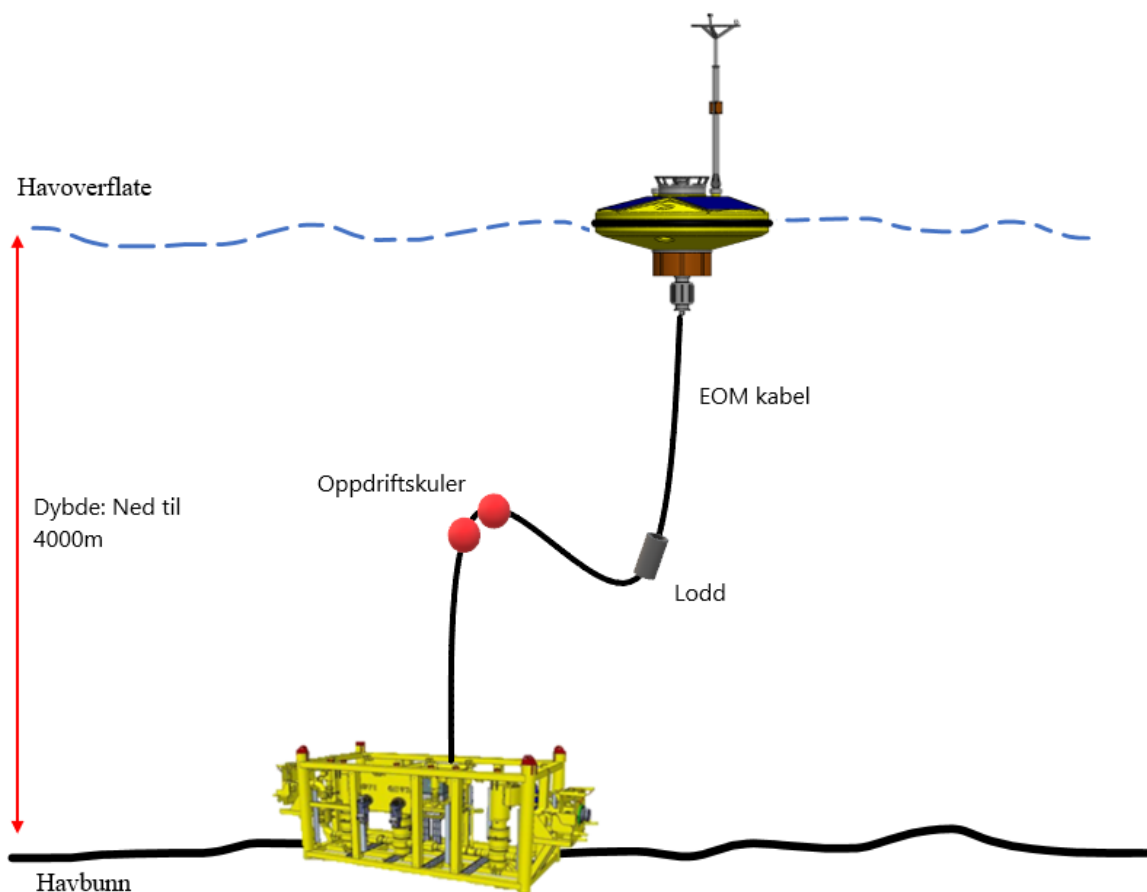
*Figur 13 Oppdriftsanker, illustrasjon*

Det kan også benyttes lodd på en seksjon ovenfor den halvstramme forankringslinen, som har som funksjon å dra den «halvstramme» fortøyningslinen nedover ved gravitasjon på loddene. Dette er med på å holde bøyen relativt rolig og stabil over den falske bunnen.

Forankringsmetoden er svært modifiserbar, og kan ettersom hvilke dybder man skal operere på, endre både dybden på den falske bunnen samt om man benytter lodd eller ikke.

Denne kombinasjonen av oppdriftskuler og lodd gir en såkalt «S» fasong på forankringslinen, og går også ved navnet S-lineforankring. Metoden vil gi mye rom for at bøyen kan drifte fritt, men pga. loddene lenger ned og oppdriftskulene som vil rett opp, vil fortøyningslinen normalt korrigere seg selv tilbake til over forankringspunktet uten å påføre forankringssystemet store krefter, se figur 14.

S-lineforankring kan benyttes for installasjoner hvor det kreves strøm og kommunikasjon mellom bøye og undervannsanlegg. Her er det som nevnt å justere oppdriften til ankeret ettersom hvor tung forankringskabelen er eller for å øke stabiliteten enda mer.



*Figur 14 S-line, illustrasjon*

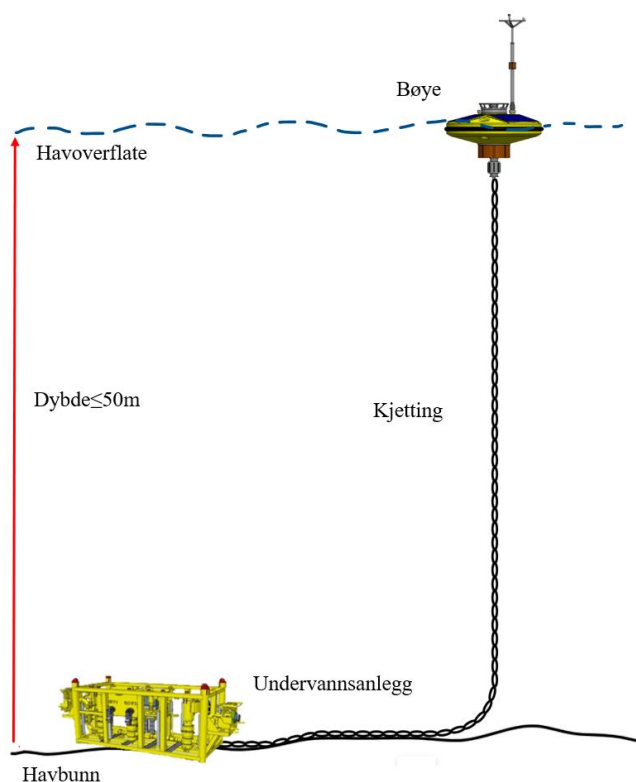
### **EOM-kabel som forankringsline**

For å opprette kommunikasjon og strømtilførsel til havbunnen kan det benyttes en EOM-kabel (Electro Optical Mechanical cable). Denne fungerer som både en strøm- og signalledende kabel, og som selve forankringslinen til bøyen. Kabelen kan designes mtp. hvilke krefter den blir utsatt for, og man kan endre materialer og egenskaper ettersom hva man trenger. En EOM-kabel kan tilføre strøm til instrumenter og installasjoner på havbunnen ned til en dybde på 4000 meter under overflaten. (Junwei, Shaowei, Wencai, Yongzhi and Huaining, 2020).

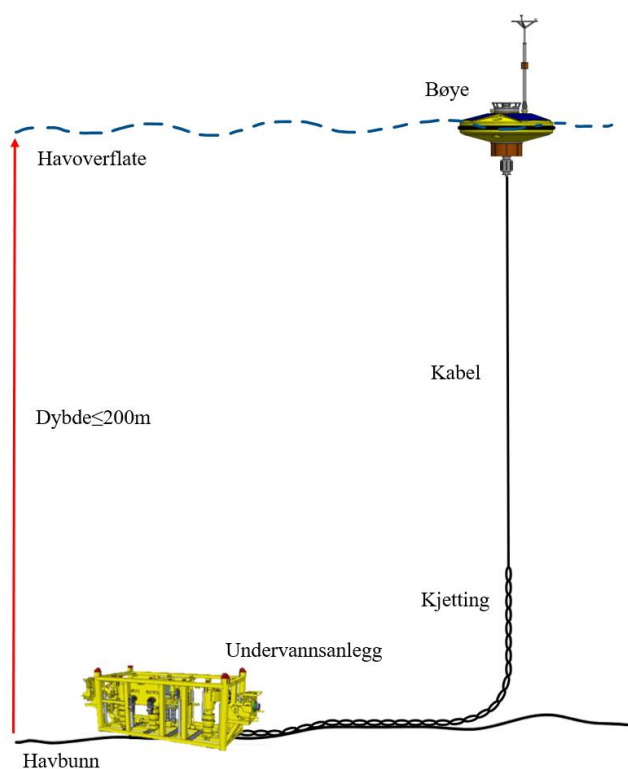
En slik kabel er effektiv for operasjoner ned mot ekstreme dybder hvor det kreves strøm og kommunikasjon. Kabelen trenger kun ett forankringspunkt, og mindre kompliserte systemer med falsk havbunn, se figur 14. OneSubsea sitt undervannsanlegg skal driftes på 1000 meters dybde, og med denne forankringsmetoden gis det store rom for å modifisere forankringskabelen etter dybden man skal operere på.

### 3.5.4 Metode 3: Ettpunktsfeste med tung kontaktline.

Metoden benytter én fortøyningsline og baseres på prinsippet om kontaktfortøyning som består av enten ren kjetting, figur 15, eller en kombinasjon av kjetting og vaiere, figur 16. Denne metoden fungerer som regel ved at en lengre kjetting er festet til forankringspunktet på bunnen og som vil vha. gravitasjon og egenvekten til kjettingen alltid vil trekke bøyen delvis tilbake til utgangspunktet om den drifter av sted med vær og vind.



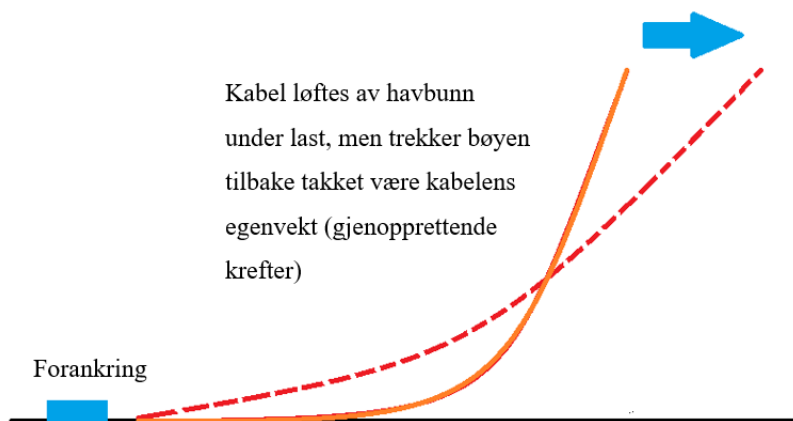
Figur 15 Hel kjetting



Figur 16 Kjetting, kombinert

Den tunge forankringslinen vil legge seg på havbunnen. Når bøyen strekkes vil den løftes opp og strammes, noe som også vil fungere som tilbaketrekningskraft når linen synker igjen. Dette kalles gjenopprettende krever, se figur 17.





Figur 17 Ettpunktsfeste med tung line, illustrasjon

For grunnere scenarier kan det bli benyttet ren kjetting, mens for dypere scenarier kan det benyttes en kombinasjon av kjetting og andre elastiske materialer som ble nevnt i «metode 1».

## 3.6 Kommunikasjon

Kommunikasjon ift. prosjektet vil være i hovedsak for å unngå at skipstrafikk kolliderer med vår stasjonære bøye. For å unngå at dette forekommer finnes det godt etablerte løsninger på markedet.

**Lys**, for å avverge situasjoner hvor fartøy er på kollisjonskurs med løsningen, vil det være nødvendig å installere et lys som lyser i alle retninger. Det viktigste for denne installasjonen er plassering av lyset og at det ikke er en blokkering som skaper en blindsoner.

**AIS**, en forkortelse for automatisk identifikaasjonssystem, er et system som benytter satellitter for å kommunisere. Systemet fungerer sånn at man har plassert en node i fartøy, oljeplattform, offshore vindpark o.l., som kommuniserer med satellitter for å oppgi informasjon om seg selv. Denne informasjonen kan være navn, destinasjon, avreisepunkt, nasjonalitet, hastighet, posisjon m.m. I vårt tilfelle vil det være navn, nasjonalitet og posisjon som vil kommuniseres.

**Radar**, er en forkortelse for radio deteksjon og avstandsmåling. Det er system basert på at man sender ut et radiosignal fra en antenne i en retning, hvis signalet treffer noe blir det reflektert og sendt tilbake. Tiden det tar før signalet returnerer avgjør hvor langt unna denne gjenstanden befinner seg.

Videre kan man også sette opp en «Radar Target Enhancer», med formålet om å gjøre det reflekterte radarsignalet sterkere hos mottakerne. Dette vil minske sjansen for at bøyen overses av fartøyer som passerer. Dette fungerer ved at radarsignalet tas inn, og signalet reflekteres mellom speil før det sendes tilbake til avsender.

## 4 Resultater

I dette kapitlet blir resultatet av simuleringer presentert, og valg av løsninger på forskjellige problemområder blir tatt.

### 4.1 Simulering av solcellepaneler

Som nevnt i kapittel 3 Teori, ønsker gruppen å finne ut den optimale vinkelen for solcellepanelene, og finne den løsningen som gir maksimalt areal av solcellepaneler på løsningen. Dette ble simulert i programmet Rhinoceros. I figur 19 kan man se lokasjonene værdataene er hentet ifra og i vedlegg 2 og 3 kan man se oppsett for simuleringene.

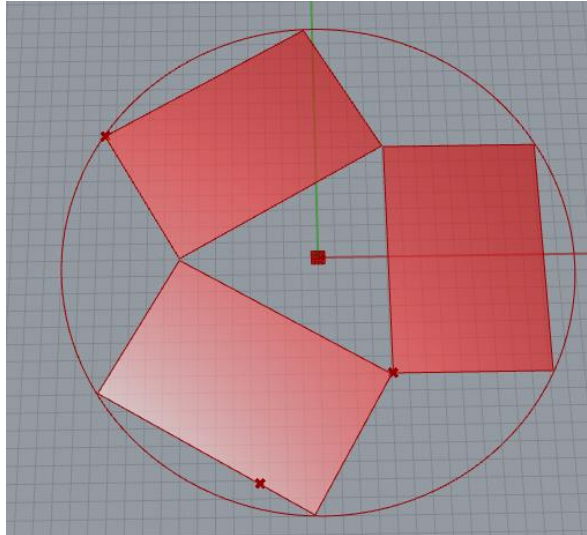
#### 4.1.1 Simulering av maksimalt areal

Simuleringen for å maksimere arealet til solcellepanelene har blitt gjort ved å gi programmet tilgang til de ulike parameterne: høyde og bredde av solcellepanel og antall solcellepaneler. Samtidig må programmet unngå at panelene går inn i hverandre. Vi har begrenset parameterne til høyde og bredde ifra 50-140cm, og antallet solcellepaneler fra 0-10. Samtidig er panelene låst i horisontal vinkel  $0^\circ$ , for å ikke kollidere hvis man skulle endre vinklene. Alle panelene er satt til å ha lik størrelse. Nedenfor i tabell 6 vil vi kunne se de optimale parameterne.

Tabell 6

De 5 mest arealeffektive parameterne

Antall solcellepaneler	Høyde [cm] Solcellepanel	Bredde [cm] Solcellepanel	Areal [cm <sup>2</sup> ] (0=kollisjon)
3.00	91.00	140.00	38220.0
3.00	92.00	138.00	38088.00
3.00	91.00	139.00	37947.00
3.00	92.00	137.00	37812.00
3.00	90.00	140.00	37800.00

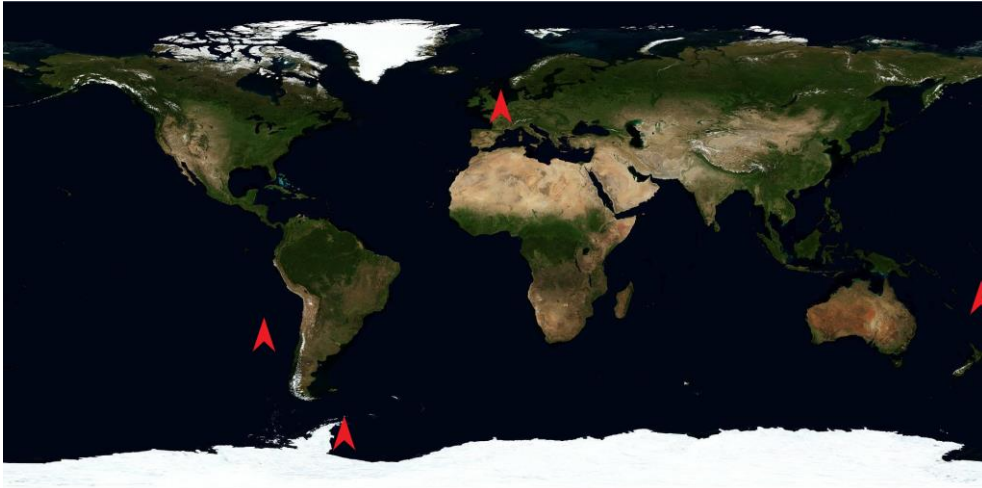


*Figur 18 Optimal løsning, vist i Rhinoceros*

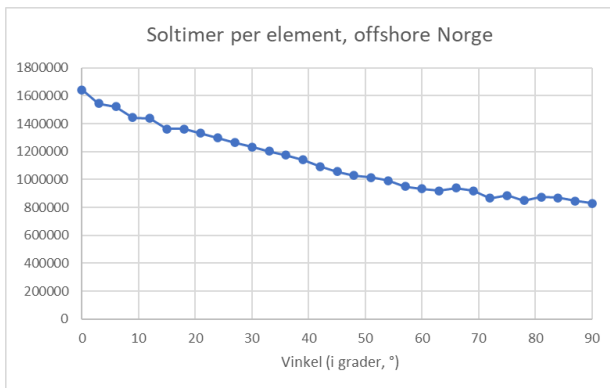
For å komme frem til disse parameterne har programmet gått gjennom 6151 forskjellige kombinasjoner, hvor disse 5 parameterne var de som oppnådde høyest areal, uten å gå utover dimensjonen til bøyen, og uten at de kolliderer med hverandre.

#### **4.1.2 Optimalisering, vinkling av solcellepanel uten skygge**

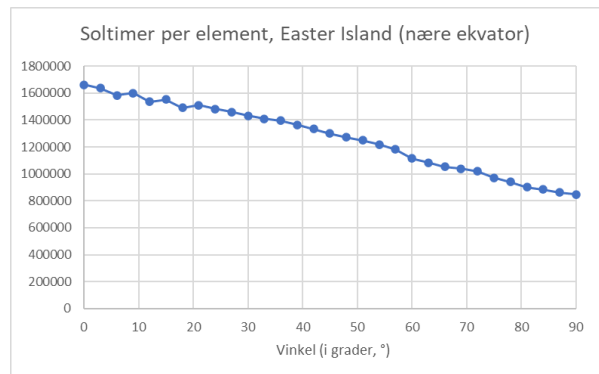
For simuleringen av vinklingen av solcellepanelene, har vi gitt Rhino tilgang til å styre med vinkelen mellom 0-90 °, for å maksimere antall soltimer. Antall soltimer vist i figurene 20-24, vil være antall soltimer \* element. Dette er ikke et tall man kan benytte direkte i formelen for solkraft nevnt i kapittel 3 Teori. For å kunne benytte seg av dette tallet er man nødt til å endre formelen for å regne ut soltimer med arealet av et enkelt element. Nedenfor i figurene 20-23 ser vi på de optimale vinklene på fire forskjellige lokasjoner i verden. To valgt nære ekvator, et sør for ekvator og et nord for ekvator.



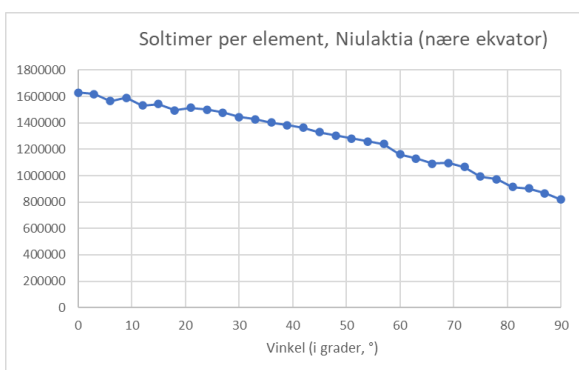
Figur 19 Lokasjoner for innhenting av værdata



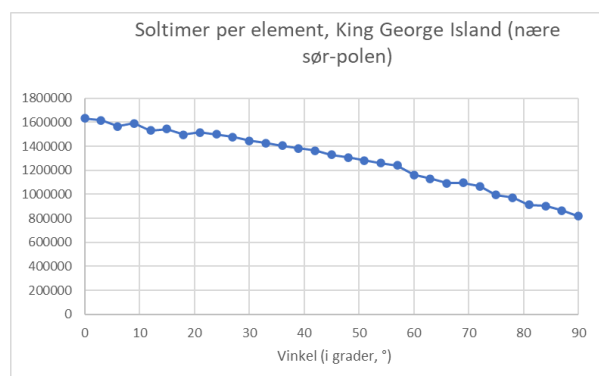
Figur 20 Soltimer per element, offshore Norge



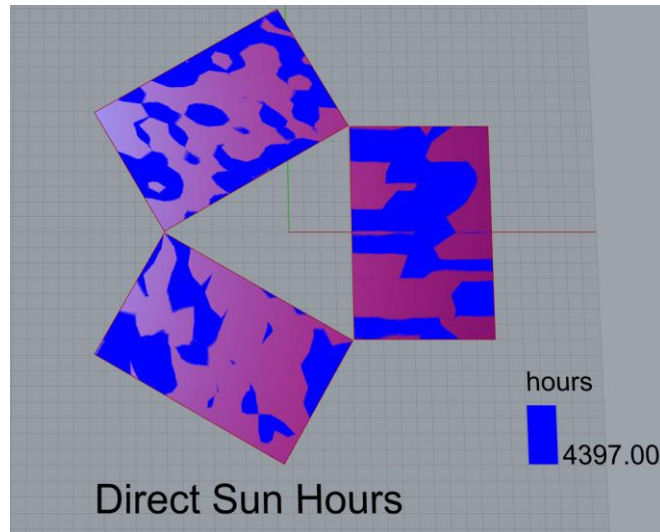
Figur 21 Soltimer per element, Easter Island (nær Ekvator)



Figur 22 Soltimer per element, Niulaktia (nær ekvator)



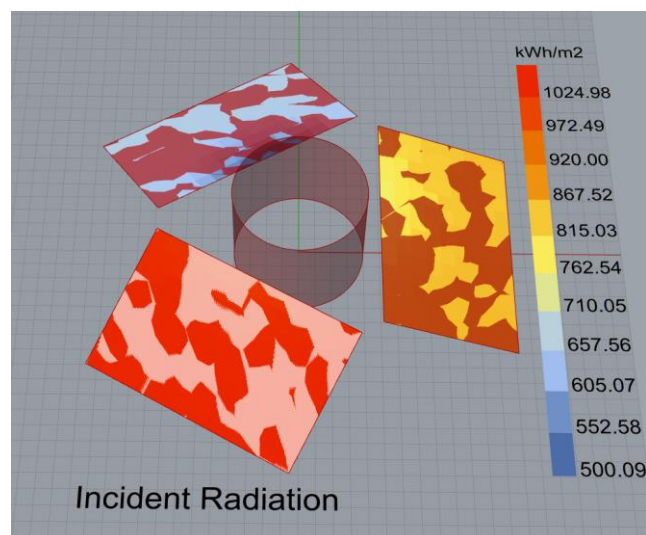
Figur 23 Soltimer per element, King George Island (nær Sør-polen)



Figur 24 Optimalt resultat, King George Island, Rhinoceros

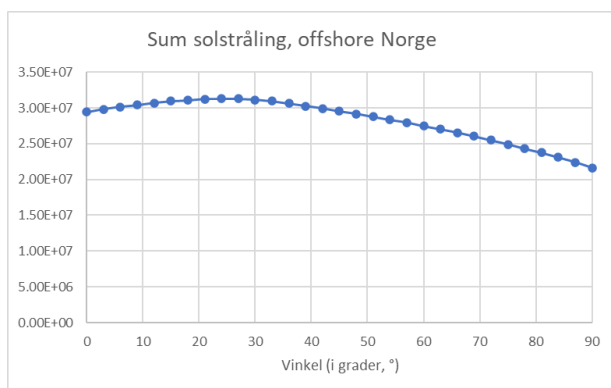
### 4.1.3 Optimalisering, vinkling solcellepanel med skygge

For simuleringen av vinkling av solcellepanel med skygge, har vi gitt Rhino tilgang til å kontrollere vinkelen igjen mellom 0-90 °, for å maksimere antall  $kWh/m^2$ . Her er det solstråling som måles, og ikke soltimer. Antall  $kWh/m^2$  vist i figurene 25-29, vil være antall  $kWh/m^2$  \* element. For å simulere konseptet er det bygd opp en sylinder mellom panelene som vist på figur 25. Lokasjonene vil være de samme som gjennomgått i kapittel 4.1.2.

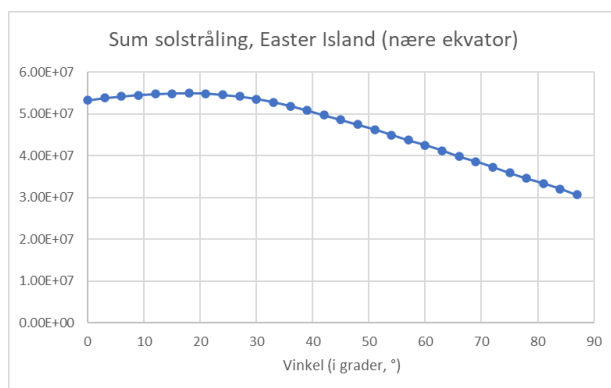


Figur 25 Optimalt resultat, med skygge, offshore Norge

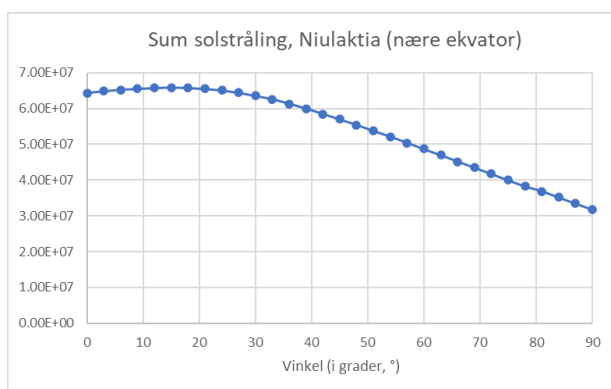
I figur 26-29 vises resultatene for alle forskjellige vinklinger, for de forskjellige lokasjonene.



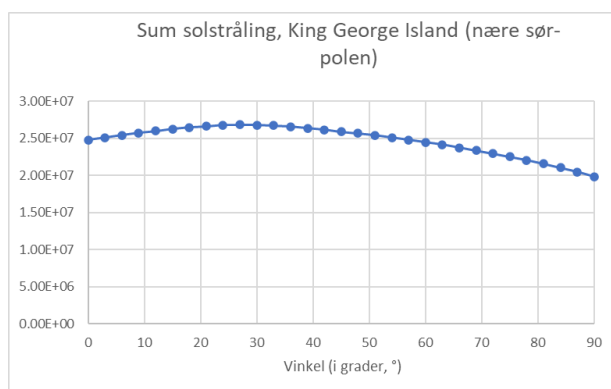
Figur 26 Sum solstråling, offshore Norge



Figur 27 Sum solstråling, Easter Island (nære Ekvator)



Figur 28 Sum solstråling, Niulaktia (nære Ekvator)



Figur 29 Sum solstråling, King George Island (nære Sør-Polen)

## 4.2 Energityper

Som nevnt i kapittel 1.5.1., vil det være et krav tilnærmet 430kWh per år for hele anlegget. Nedenfor beregner vi strømproduksjon for de forskjellige energitypene, og sammenligner disse. Tallene er prøvd gjort så realistiske som mulig.

## 4.2.1 Estimerer av strømproduksjon

### Bølgekraft

Beregningene for bølgekraft er gjort via formel 3 funnet i kapittel 3 Teori. Under er den endelige formelen gjengitt.

$$(3) P = \frac{\rho g^2}{64 \pi} H^2 T_p b \eta T_y$$

Hvor P gir oss kWh per år.  $\rho$  er massetettheten til vann ( $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ).  $g$  er gravitasjonskraft ( $\approx 9.81 \text{ m/s}^2$ ).  $\pi \approx 3.14$ .  $H$  er høyden på bølgen fra bunn til topp (m).  $T_p$  er perioden mellom bølgetoppene (s).  $b$  er bredden på bølgekraft-anlegget i meter.  $\eta$  er virkningsgraden til anlegget.  $T_y$  er tidsperioden i antall timer (per år i vårt tilfelle).

Vi gjør en antagelse, og sier en gjennomsnittlig bølge har en høyde på 2.5 meter og en periodetid på 8 sekunder. La oss også anta at vår bøye har en bredde på 1 meter. I vår samtale med Havkraft AS, ble vi fortalt at vi med trygghet kunne bruke en virkningsgrad på 0.3 (30%), da deres anlegg kunne oppnå mye høyere enn dette (Solheim, Geir Arne, CEO Havkraft AS. Digitalt møte/intervju, 01.04.22).

$$P = \frac{1000 * 9.81^2}{64\pi} 2.5^2 \times 8 \times 1 \times 0.3 \times 8760 = 62893 \text{ kWh} \approx 62.8 \text{ MWh per år}$$

Om vi skulle vært utrolig konservative i vårt anslag av en gjennomsnittlig bølge i løpet av et år, og valgt en bølge høyde på 1 meter, og en periodetid på 1 sekund, ville vi fått dette:

$$P = \frac{1000 * 9.81^2}{64\pi} 1^2 \times 1 \times 1 \times 0.3 \times 8760 \approx 1257 \text{ kWh per år}$$

Hvis man skulle snudd på formel 3 for å regne ut hvilken bredde bølgekraftanlegget måtte ha ville man fått denne formelen:

$$(6) b = \frac{P 64 \pi}{\rho g^2 H^2 T_p \eta T_y}$$

Som med de pessimistiske tallene våre ville gitt:



$$b = \frac{430 \times 64\pi}{1000 \times 9.81^2 \times 1^2 \times 1 \times 0.3 \times 8760} \approx 0.0004m$$

## Vindkraft

Beregningene for vindkraft er gjort via formel 4 funnet i kapittel 3 Teori. Under er den endelige formelen gjengitt.

$$(4) P = \frac{1}{2000} A \rho v^3 \eta T_y$$

Hvor  $P$  gir oss antall kWh per år.  $A$  er arealet av området bladene til vindturbinen dekker ( $\pi * r^2 = m^2$ ).  $\rho$  er massetettheten til luft ( $\approx 1.23 \text{ kg}/m^3$ ).  $v$  er hastigheten til vinden ( $\approx 6.64m/s$ ).  $\eta$  er virkningsgraden til vindkraftverket (som nevnt i kapittel 5 Teori  $\approx 35 - 45\%$ ).  $T_y$  er antallet timer i året.

Vi antar at vår bøye tåler et vindkraftverk med en horisontal akse med en radius på 1 meter for å unngå å bli for ustabil, og en virkningsgrad på 0.35. Da får vi dette:

$$P = \frac{1}{2000} 1^2 \times \pi \times 1.23 \times 6.63^3 \times 0.35 \times 8760 \approx 1726kWh \text{ per år}$$

Med konservative tall i vårt anslag, tåler vår bøye maksimalt et vindkraftverk med en horisontal akse med en radius på 0.5 meter, i tillegg til et konservativt anslag med virkningsgrad på 30% og en lavere vindhastighet enn nevnt ovenfor. Da får vi dette:

$$P = \frac{1}{2000} 0.5^2 \times \pi \times 1.23 \times 5^3 \times 0.30 \times 8760 \approx 158 \text{ kWh per år}$$

Hvis vi snur på formelen ovenfor, hvor vi benyttet de realistiske tallene for å finne nøyaktig minimum radius vindkraftverket må ha, vil vi få dette:

$$(7) r = \sqrt{\frac{2000 P}{\pi \rho v^3 \eta T_y}}$$

Utreget med tallverdier:

$$r = \sqrt{\frac{430 \times 2000}{\pi \times 1.23 \times 6.63^3 \times 0.35 \times 8760}} \approx 0.499m$$

## Solkraft

Beregningene for solenergi er gjort via formel 5 funnet i kapittel 3 Teori. Under er den endelige formelen gjengitt.

$$(5) P = \frac{T_s P_s A \eta T_y}{1000}$$

I Europa er det målt gjennomsnittlig 2335 soltimer per år, i årene 1983-2012 (Copernicus, 2019). Dette vil gi et gjennomsnitt på ca. 6 soltimer per dag. Vi bruker en gjennomsnittlig solstråling på  $340 \text{ w/m}^2$  (Wikipedia, 2022) og en virkningsgrad på 20% (University of Michigan, 2021). Vi fant også ut i kapittel 3.1 at vi kunne oppnå et maksimalt areal på  $38220 \text{ cm}^2$  eller  $3.822 \text{ m}^2$ .

$$P = \frac{6 \times 340 \times 3.822 \times 0.20 \times 365}{1000} \approx 569 \text{ kWh per år.}$$

Hvis vi skal være noe mer konservative i vårt anslag kan vi gjøre den samme utregningen med 4 timer gjennomsnittlig soltid per dag, en lavere solstråling på  $250 \text{ w/m}^2$ , samt en virkningsgrad på 15%. Da får vi dette:

$$P = \frac{4 \times 250 \times 3.822 \times 0.15 \times 365}{1000} \approx 209 \text{ kWh per år.}$$

Snur vi på denne formel 5 for å finne arealet vi vil trenge, får vi denne formelen:

$$(8) A = \frac{1000 P}{T_s P_s \eta T_y} = 3.42m^2$$

Setter vi så inn de realistiske tallene får vi dette:

$$A = \frac{430 \times 1000}{6 \times 340 \times 0.2 \times 365} \approx 2.89m^2$$

## 4.2.2 Sammenligning av de forskjellige energitypene

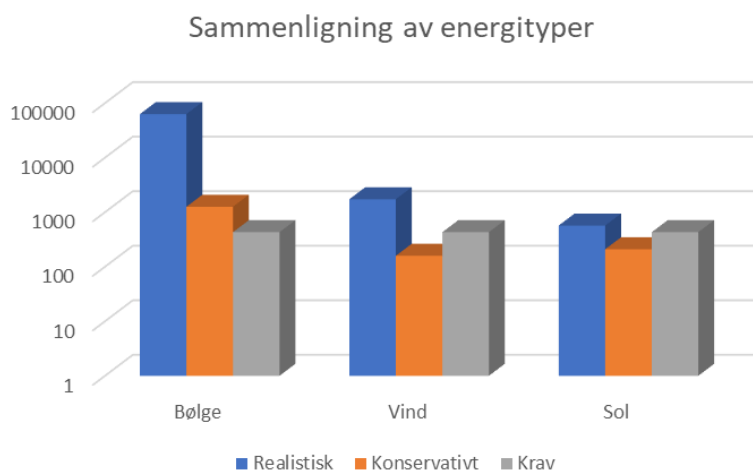
Den viktigste faktoren for valget av energitype, er at den genererer nok strøm, men det finnes også andre faktorer som kan være med å avgjøre valget.

**Stabilitet:** Det er viktig at systemet holdes operativt. Hvis man f.eks. får en løsning som blir meget ustabil, og ofte kan kantre pga. bølger, vind etc. vil dette være en dårlig løsning, siden systemet krever å være operativt over lengre perioder uten tilsyn.

**Vedlikeholdsbehov:** Som nevnt over er det viktig at systemet må kunne operere over lengre tid uten tilsyn, og hvis løsningen krever hyppige serviceintervaller vil dette være en dårlig løsning.

**Kostnad:** Løsningen er ikke ment for å levere strøm til strømmettet, og derfor er ikke en pris per kWh like aktuell her, som f.eks. ved et vindkraftverk på land. Allikevel er det viktig at man sparer penger der man kan i et selskap, og det er derfor heller ikke behov for å overdimensjonere produksjon av strøm.

Under i figur 30 vises en sammenligning av resultatene funnet via utregningene gjort ovenfor, hvor den blå søylen representerer et realistisk tall på antall kWh, oransje et konservativt, og grå søyle viser hva som faktisk kreves. Den vertikale aksene er en logaritmisk skala, for at noen av søylene i det hele tatt skal vises. Bølgekraft leverer høyt over hva som kreves, størrelsen på søylene kan derfor være litt misvisende ift. hva som er realiteten.



Figur 30 Sammenligning av energityper

Ut ifra figur 30, kan man se at bølgekraft produserer alt for mye strøm ift. hva som behøves for vår løsning. Vind og sol er relativt like, og begge kan være aktuelle løsninger hvis man kun ser på produksjonen av strøm som avgjørende faktor. Hvis man går inn på de andre faktorene nevnt over kan man skille ut hvilken av disse to som kan være mest aktuell.

**Stabilitet:** Ved valg av solceller, legger gruppen til grunn at vekten av disse vil være neglisjerbar kontra vekten av selve bøyen. Ser man derimot på vindkraft som må ha et vindkraftverk med radius på minimum 0.54m, altså over 1 meter i diameter, kan det føre til ustabilitet pga. høyere tyngdepunkt.

**Vedlikeholdsbehov:** En vindturbin har flere bevegelige deler som kreves for at den skal generere strøm, som blader, turbinen etc. Med bevegelige deler er det behov for vedlikehold, og med dynamiske krefter som påføres vil det aldri være noe garanti for vedlikeholdsfri drift. Med solceller er det ingen bevegelige deler, og det vil derfor være mindre sannsynlig at det kreves vedlikehold utover det gitte intervallet.

**Kostnad:** Hadde bølgekraft fortsatt vært et aktuelt alternativ, kunne kostnad vært en avgjørende faktor, men kostnaden for vindkraft kontra solkraft er neglisjerbar i en slik løsning. Det vil være noe differanse, men i et så stort prosjekt vil den ikke være avgjørende.

Ut ifra opplysningen over har gruppen konkludert med at valget av energitype vil falle på solenergi. Dette fordi den produserer mer enn nok strøm, den gir ikke bøyen flere utfordringer med stabilitet enn utgangspunktet, og den har minst sannsynlighet for å kreve vedlikehold utenfor de angitte intervallene.

## 4.3 Reserveenergi

Selv om det er vanlig å bruke brenselceller i bøyer, er strømproduksjonskravene til bøyekonseptet vårt ikke store nok til at det er behov for brenselceller. Riktignok bruker *Fugro SEAWATCH Wind lidar Bouy* en brenselcelle som reserve, men denne bøyen har en lidarsensor på 100W som trekker mye av den tilgjengelige energien deres bøye har (Norangshol, Jørn Erik. Fugro/Service Line Director. Digitalt møte/intervju, 26.04.22), en komponent vårt konsept ikke benytter seg av.

Siden konseptet krever 430kWh for ett års bruk, gjenstår det å bestemme batterikapasitet på nødvendig batteri. Spenning i kabelen til subseanivå ligger på 600V DC for å minimalisere spenningsfall. Formel 9 for beregning av batterikapasitet ser slik ut (Inch calculator, 2022):

$$(9) Ah = \frac{kWh \times 1000}{V}$$

For å beregne nødvendig kapasitet på batteri kan man se på to ulike scenarier:

#### **Scenario 1: Batterikapasitet for ett helt år**

$$\frac{430kWh \times 1000}{600V} = 716.67Ah$$

For å kunne drifte hele subseaninstallasjonen i tillegg til alt av kommunikasjon på selve bøyen, kreves det en kapasitet på 850Ah.

#### **Scenario 2: Batterikapasitet for 4 måneder**

$$\frac{143.3kWh \times 1000}{600V} = 238.89Ah$$

Realistisk sett vil vi i størst mulig grad benytte oss av fornybar energi for å produsere nødvendig strøm. Med mulig 569kWh produsert fra solceller vil det for redundans ikke være mer behov for batterikapasitet enn for fire måneder. Til dette vil behovet for batterikapasitet komme på 238.9Ah. Som en ekstra sikkerhetsfaktor blir batterikapasiteten rundet opp til 300Ah.

## **4.4 Forankring**

For resultatene og endelig valg av forankringsmetode vi ønsker å anbefale videre, ble det gitt en vurdering på de nevnte områdene på en skala fra 1 til 5. Karakter 5 betyr at metoden løser kriteriet svært godt, og karakter 1 svært dårlig eller ikke er passende for vårt scenario.

Tabell 7

Vurderingskriterier for Flerpunktsforankring

Vurderingskriterier	Begrunnelse for karakter	Karakter
<b>Slitasje på strømkkabel</b>	Metoden holder den strømførende kabelen svært rolig grunnet at bøyen er tilnærmet lik fastspent.	<b>5</b>
<b>Kompleksitet</b>	Relativ kompleks løsning, mye jobb og svært lite kostnadseffektivt med flere forankringspunkter.	<b>2</b>
<b>Dybde</b>	Metoden kan benyttes for de fleste situasjoner, men vil ettersom dybden øker bli mindre økonomisk.	<b>3</b>
<b>Krefter på selve forankringen</b>	Metoden vil tåle en del krefter, grunnet alle forankringspunktene, men vil også bli utsatt for en del ekstra krefter i og med at den ikke flyter med strømmen, men derimot prøver å holde med forankringspunktene.	<b>3</b>

Tabell 8

Vurderingskriterier for oppdriftsanker

Vurderingskriterier	Begrunnelse for karakter	Karakter
<b>Slitasje på strømkkabel</b>	Slitasje vil komme i form av strømminger på kabelen under vann, samt krefter påført av vind og bølger på bøyen på overflaten.	<b>4</b>
<b>Kompleksitet</b>	Løsningen er relativt simpel, spesielt ift. hvor dypt det skal forankres og den krever ingen spesielt komplekse	<b>5</b>

	løsninger for å forankre bøyen.	
<b>Dybde</b>	Gode muligheter for å skreddersy løsninger avhengig av hvor dypt forankringen skal foregå (Kan gå ned til 4000 meter)	<b>5</b>
<b>Krefter på selve forankringen</b>	Kraftig vind på overflaten vil dra bøyen bortover som igjen vil påføre krefter på kabelen. Takket være oppdriftskulene vil ikke forankringskabelen få utslagsgivende påkjenninger som den ikke er designet for å tåle.	<b>4</b>

Tabell 9

Vurderingskriterier for ettpunktsfeste med tung kontaktline

<b>Vurderingskriterier</b>	<b>Begrunnelse for karakter</b>	<b>Karakter</b>
<b>Slitasje på strømkabel</b>	Metoden åpner for kraftig slitasje mtp. hvordan kabelen og forankringen vil kunne surre seg sammen og ødelegge for strømtilførsel.	<b>1</b>
<b>Kompleksitet</b>	Løsningen er ikke spesielt kompleks, men i vårt tilfelle vil det kunne by på utfordringer mtp. hvordan man skal løse det for å unngå at den strømførende kabelen vikler seg sammen med forankringen.	<b>3</b>
<b>Dybde</b>	Gode muligheter for å tilpasse forankringsmetoden ettersom hvilke dybder man skal ankre opp på. Ref. figur 15 og 16	<b>4</b>

<b>Krefter på selve forankringen</b>	Det vil være flere typer krefter på en forankringsmetode som baserer seg på gjenopprettende krefter for å rette seg opp. bl.a. sleping langs havbunnen, bøying og tøying pga. undervannsstrømninger.	<b>3</b>
--------------------------------------	--	----------

### Sammenligning og summering av karakter for forankringsmetoder:

Som nevnt i tidligere kravspesifikasjoner er det flere kritiske suksessfaktorer for vårt prosjekt og vi har valgt ut fire viktige områder som våre valg for metode har blitt basert på. Noen av faktorene er mer kritiske enn andre og vil bli vektlagt ekstra i tilfellet det skulle stå å vippe mellom flere forankringsmetoder.

Vi har valgt å vektlegge «**slitasje på strømkabel**», «**dybde**» og «**kompleksitet**», om det skulle bli nødvendig å skille mellom to metoder for endelig valg av forankringsmetode for bøyen.

Tabell 10

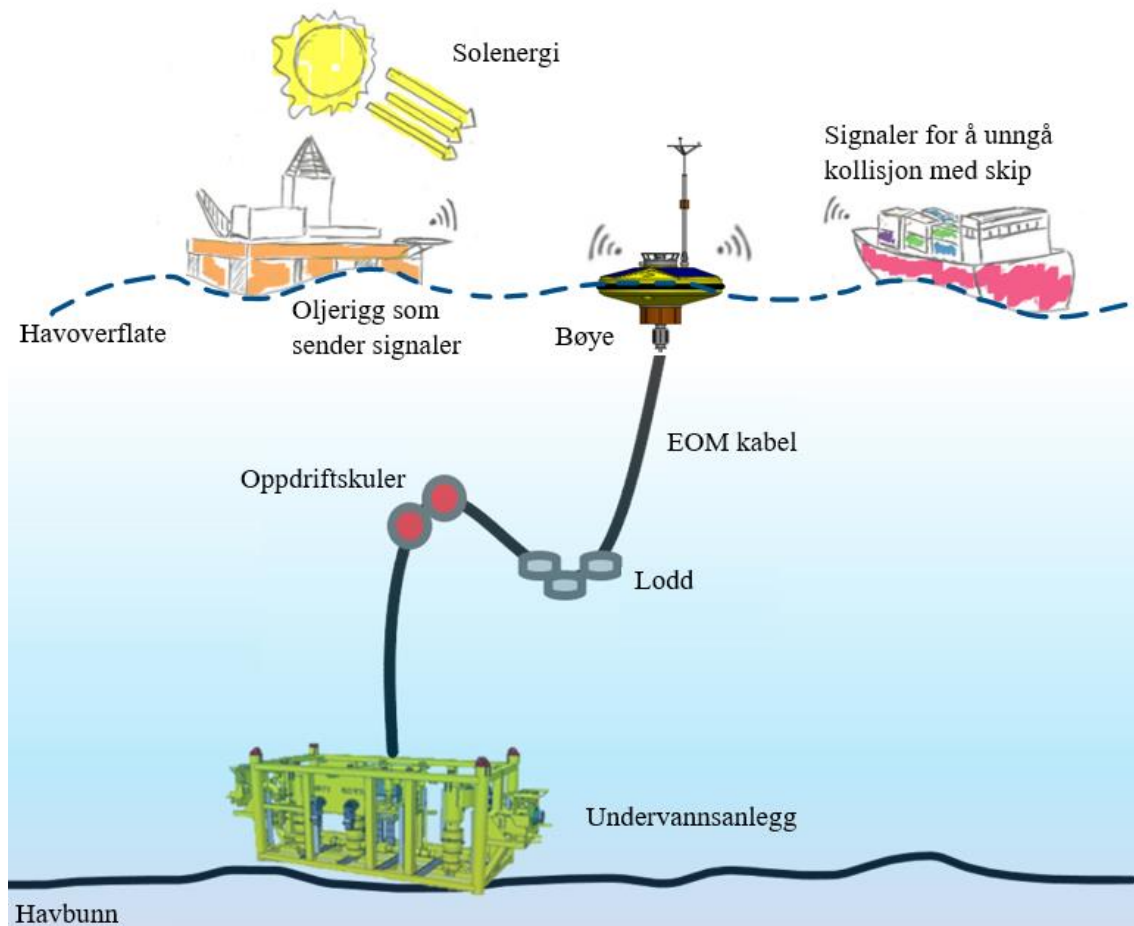
Sammenligning og sum karakterer for forankringsmetoder

Metode	Slitasje på strømkabel	Kompleksitet	Dybde	Krefter på forankringen	Sum karakterer
<b>Flerpunktsforankring</b>	5	2	3	3	<b>13</b>
<b>Oppdriftsanker</b>	4	5	5	4	<b>18</b>
<b>Kontaktline</b>	1	3	4	3	<b>11</b>



## Valg av forankringsmetode:

Ut ifra de undersøkelsene vi har gjennomført innenfor de forskjellige forankringsmetodene som oftest er benyttet for dypvannsbøyer, kan vi se at en kombinasjon av «falsk havbunn» og «EOM-kabel som forankring» har tydelig flest positive sider ved seg og vil være det mest gunstige valget å gå for. Det er fortsatt et område med store muligheter for teknologisk fremgang, men også en forankringsmetode som er svært pålitelig og allerede testet at fungerer på en rekke forskjellige dybder (Junwei, Shaowei, Wencai, Yongzhi and Huaining, 2020). Samtidig kan dagens standard på en EOM-kabel fint opprettholde stabil kommunikasjon og strømtilførsel ned til et undervannsanlegg på 1000 meters dybde. Figur 31 viser en tenkt løsning for forankring.



Figur 31 Oppdriftsanker, illustrasjon

## 4.5 Kommunikasjon

Hovedfokuset for gruppen ift. kommunikasjon har vært unngåelse av kollisjon i vårt utstyr fra passerende skip o.l. Kriterier for valg av løsning: strømforbruk, kostnad og størrelse på utstyr.

For å få til en helhetlig løsning for dette finnes det mange muligheter på markedet, men en kombinasjon av disse vil styrke muligheten for at kollisjoner ikke skal forekomme. En kombinasjon av både lys, AIS og en radar-reflektor vil være en god løsning, samtidig som det ikke vil kreve alt for mye energi for å holdes operativt. Kostnaden på utstyret er så liten ift. hva kostnaden for produksjon av bøyeløsningen helhetlig vil koste, dermed er den neglisjerbar. Det finnes løsninger på markedet som har en kombinasjon av AIS og lampe i samme løsning, og hvis man går for en slik type løsning vil størrelsen være liten, og den vil også være ment for å sitte i toppen av og midt over bøyen for å unngå at den skaper mer ustabilitet enn nødvendig.

## 5 Diskusjon og analyse

I dette kapittelet blir de endelige løsningene diskutert og analysert opp mot kravspesifikasjonene, simuleringene og det endelige resultatet. Basert på diskusjon og analyse vil det bli gitt en anbefaling til oppdragsgiver for videre arbeid.

### 5.1 Diskusjon rundt gjennomføring av oppgaven

I starten av prosjektet brukte prosjektgruppen mye av sin tid på å utforske ulike løsninger for å dekke energibehovet til løsningen. De første energikravene fra oppdragsgiver var relativt lave (24kWh). Ut ifra dette kravet kunne man raskt konkludere med at de forskjellige energitypene ville kunne dekke behovet. Etter prosjektets gang fikk vi nye tall vi måtte jobbe mot fra oppdragsgiver, og etter hvert som vi koblet på nødvendig utstyr for kommunikasjon endret dette tallet seg en hel del. Det endte opp med å bli et endelig krav på 430kWh. Dette resulterte i at vi måtte gå tilbake på tallene vi hadde regnet ut, for å se om beregningene ville dekke det nye kravet, og eventuelt dimensjonere løsningene for å oppnå det nye kravet.

Ut fra problemstillingen vår å utforske muligheten for et «Frittstående bøyekonsept med fornybar strømtilførsel for subseainstallasjoner» har vi vært innom mange delspørsmål, som strømtilførsel, batteriløsning, forankring, kommunikasjon etc. Med en så vid oppgave har man ikke muligheten til å gå i dybden på alle de forskjellige områdene, og man er svært avhengig av hva man finner i en litteraturstudie. Noen av områdene har vært relativt enkle å finne svar på, mens andre har krevd omfattende undersøkelser og vi har vært avhengig av bistand fra eksperter på områder innenfor forskjellige fagfelt. Her har vi prøvd oppnå kontakt med forskjellige bedrifter, og fått bistand fra noen av dem.

Et av de store problemene med et slikt bøyekonsept som vårt, er forankringen av bøyen på dypt vann. Her kreves det spesialkompetanse som gruppen ikke innehar. Gruppen var innom muligheten for å forsøke å simulere løsninger i «Abaqus», men etter råd fra flere fagpersoner ble det konkludert med at dette ikke var å anbefale. Dette problemet i seg selv kunne vært en egen master-/bacheloroppgave, og det ville blitt et for stort fokus for gruppen med de andre

utfordringene i oppgaven. Derfor har vi valgt å heller søke etablerte løsninger som finnes på markedet, og vi har funnet flere kilder som viser at det er mulig å utføre forankringen. I stedet for å gjøre egne simuleringer, som eventuelt ville vært upresise, har vi valgt å basere oss på den eksisterende forskningen.

## 5.2 Diskusjon av estimeringer og simuleringer

Estimering og beregning av hvor mye energi man får ut av de forskjellige energitypene er i stor grad avhengig av værdata. Ift. sol er det gått ut ifra soltimer i snitt per år. Dette vil være avhengig av lokasjon, og kan forandre seg fra år til år.

Å finne data som forteller om en gjennomsnittlig bølge gjennom et helt år har vist seg å være vanskelig, og vi måtte gjøre antagelser på høyde og periodetid for å gjøre beregningene. Vindkraft har dog tall vi kan med større pålitelighet gjøre beregninger på.

Simulering av arealet er høyst realistisk, det er bare avhengig av faktorer som bredde, høyde, antall solcellepaneler og vinkel innenfor en gitt diameter. En svak side ved simuleringen er at man er låst i en horisontal vinkel, hvis man i tillegg hadde gitt programmet full og fri kontroll over vinklingen ville man kunne oppnådd et større areal, helt oppimot uendelig ved en vertikal orientering. For å holde simuleringen innenfor aktuelle vinklinger for prosjektet ble det valgt å låse den i en horisontal retning. Man må kanskje tilpasse størrelsene noe hvis man ikke får spesiallagd et solcellepanel nettopp for denne løsningen, men man får et godt bilde på hva som vil være maksimalt tilgjengelig areal, og kan strebe etter å komme så nære som mulig. Ved at vi også i kapittel 4.2.2 har regnet ut hva minimum areal må være, vet vi hvilket område vi kan bevege oss innenfor:  $2.89m^2$  til  $3.82m^2$ .

Simulering for å finne den optimale vinklingen er i stor grad basert på værdata fra de ulike lokasjonene. Det er faktorer som spiller inn om værdataene kommer ifra et sted på land, eller offshore. På land kan f.eks. skygge fra bygninger, fjell etc. være en stor faktor. Samtidig er simuleringen utført på en måte hvor selve solcellepanelene er stasjonære. Vinklingen kan endres, men den flyter ikke opp og ned, og det er heller ikke bølger som endrer den faktiske vinklingen, som det vil være i realistiske tilfeller. Hvis man går igjennom figurene 20-29 vil

man se at spanet av optimale vinkler, på forskjellige lokasjoner i verden, varierer fra 15° til 27°.

Hvis man oppsøker informasjon om hvordan man bør vinkle et solcellepanel kommer man frem til ganske enkle formler som i stor grad baserer seg på breddegraden man befinner seg på. En enkel formel for optimal vinkling vist nedenfor:

$$\text{Optimal vinkel} = \text{Breddegrad} \pm \text{årstid}$$

Her setter man inn breddegrad for lokasjonen til solcellepanelet, og legger til eller trekker ifra noen grader avhengig av hvilken årstid man befinner seg i (De Rooji, 2020). Ut ifra formelen ovenfor, uten hensyn til årstid, så vil optimal vinkling være breddegrad. Dette gjelder hvis man ikke endrer på vinklingen underveis i året.

Videre har gruppen også sett på noen forskningsartikler om temaet, hvor artiklene har prøvd å finne optimal vinkel for en spesifikk lokasjon. I rapporten ble det konkludert med at gjennomsnittet for vintermånedene lå på 37° og sommermånedene lå på 12°. Ut ifra dette ble det fastslått at en optimal vinkling for hele året ville være 23.5°. Lokasjonen for eksperimentet befant seg på 24.5° breddegrad kunne man fastslå at breddegrad var et godt utgangspunkt for optimal vinkling av solcellepanel gjennom et helt år. (Benghanem, 2010)

Hvis man sammenligner de 4 utvalgte lokasjonenes breddegrader, kontra resultatene vi fikk i simuleringen får vi resultatene vist i tabell [9].

Tabell 11

Sammenligning av breddegrad og simuleringsresultat

	Breddegrad	Optimal fra simulering [°]
<b>Norge, offshore</b>	59	24
<b>Easter Island</b>	27	18
<b>Niulakita</b>	10	15
<b>King George Island</b>	62	27

Ser man også på tabellene [] vist i kapittel 4.1, vil man kunne se at jo nære man befinner seg ekvator, jo mer virker vinkling og ha utslag på hvor mye solstråling som treffer panelene. Noe å ta med seg videre vil være at det vil være viktigere å velge rett vinkel jo nærmere ekvator man befinner seg.

## 5.3 Diskusjon forankring

Forankring på havet er et avansert fagområde. Det finnes mange varianter av forskjellige prinsipper og det vil av den grunn være vanskelig å ta for seg alle i dybden. Gruppen valgte derfor å se på tre ofte anvendte forankringsmetoder for å se på prinsippene bak disse.

Det ble også gjort et valg på at vi heller ikke skulle gå i dybden på beregninger på forankring, grunnet dette ville blitt et svært omfattende og komplisert fagområde å by seg ut på, uten særlig kompetanse på området.

For «flerpunktsforankring» uten oppdriftsanker og «ettpunktsforankring med tung kontaktline» vil forankringslinene være i kontakt med havbunnen. Dette medfører at forankringslinen dermed må være lengre enn dybden det forankres på. Noe som igjen gjør at desto dypere forankringen foregår, jo mindre aktuell blir metoden med kontaktforankring på grunn av egenvekt, økonomiske årsaker og krefter på selve oppankringen. (Rigzone, u.å., avsnitt 9)

Det finnes også utfordringer som må tas med i betraktning ved forankring i en strøm- og signalførende kabel. Utfordringer ved metoden er påkjenninger på EOM-forankringskabelen. En slik kabel vil måtte designes for å tåle de dynamiske påkjenningene den vil bli utsatt for på havet. Problemer som kan vise seg å være en utfordring er at de optiske fibrene inne i kablene ikke nødvendigvis tåler like mye strekk og bøyning som selve beskyttelsesmaterialet utenpå kablene. Dermed kan det i det verste scenariet kunne skje at fibrene i den optiske kabelen kan ryke av, selv om beskyttelsen er intakt. Ved riktig design og materialvalg på EOM-kabelen vil risikoen for dette bli redusert. (Frye, D., Hamilton, A., Grosenbaugh, M., Paul, W., Chaffey, M. 2004)

Gruppen sine karaktergiving og vurderinger ble gjort ut ifra hva vi lærte om de forskjellige metodene i relevante og pålitelige forskningsartikler. Det vil være muligheter for noe usikkerhet i vektingen, grunnet valgene for karakter er basert på gruppens oppfatning og tolkning av litteratur.

## 5.4 Diskusjon av konsept og løsning

Det endelige konseptet som prosjektgruppen har kommet frem til er en løsning som vi mener tilfredsstillende de fleste utfordringer ved en slik problemstilling, men at det vil kreve videre arbeid. Siden oppdragsgiver ønsket å benytte allerede etablerte løsninger, vil også samarbeid mellom oppdragsgiver og andre aktører være nødvendig for å utvikle et endelig konsept. Gruppen har kun sjekket muligheten for at et slikt konsept kan realiseres og kommet frem til en anbefaling av løsninger på de forskjellige problemområdene som vi mener kan løses på en tilfredsstillende måte.

Oppgaven vi valgte var mye på bakgrunn av dens åpenhet, hvor vi så en mulighet for å designe vår helt egne løsning på problemstillingen, men i samråd med oppdragsgiver ble det uttrykt ønske om at det skulle brukes allerede kommersielt tilgjengelige løsninger, se vedlegg 6. Hvis vi skulle gått tilbake hadde vi kanskje heller prøvd å avgrense oppgaven til ett problemområde i starten, for å prøve knytte den litt mer opp mot vår studieretning, som er maskiningeniør. Oppgaven har i store deler vært ren litteraturanalyse, og er i enkelte tilfeller av beregninger på strøm, ikke er i vårt fagområde. Vi har allikevel prøvd å knytte deler av oppgaven opp mot vår studieretning, men skulle ønske vi hadde muligheten til å gjøre dette i større grad. Her var det et ønske fra vår side å gjennomføre simuleringer i Rhino for å optimalisere vinkelen på solpanelene, og å lage en modell av konseptet i Solidworks, selv om dette ikke var et krav fra oppdragsgiver.

Ved at oppgaven har bestått av en stor del litteraturanalyse har vi vært avhengig av påliteligheten til kildene vi benyttet. En mulig svakhet med en slik studie er at man i stor grad er avhengig av andres forskning på området, og derfor ikke utfører egen forskning. Vi har valgt å innhente litteratur fra relevante forskningsartikler funnet på internett, samt kryssjekket dette med aktører som eksempelvis Fugro, for å validere litteraturens pålitelighet.

## 5.5 Anbefaling for videre arbeid

Ut ifra resultatene vil vi anbefale oppdragsgiver å kontakte Fugro for videre samarbeid for å skreddersy en løsning etter deres behov. Fugro har allerede eksisterende bøye-løsninger, som dekker mye av det oppdragsgiver etterspør.

Selv om konseptet baserer seg på bruk av en allerede eksisterende bøye, vil det kreve mer utvikling for optimal funksjon. Ettersom solcellepanelene er mye større enn panelene i utgangspunktet brukt på Fugro sin modell, vil det kreve redesign og utvikling av en ny øvre bøye halvdel.

Hoved essensen i oppgaven er å drifte et subseaanlegg, dette ved å produsere og lagre strøm. I dag finnes det løsninger som baserer seg på brenselceller, for å reserve produsere strøm over lengre tid. Ved å tenke bærekraftig kan man her velge løsninger som baserer seg på fornybar energi, fremfor bruk av brenselcelleenergi som har en forurensende faktor hvis man inkluderer produksjonen av drivstoff. Det har også begynt å bli mulig å benytte hydrogen i brenselcellene som igjen kan aktualisere denne retningen.

Skreddersy løsninger for hver lokasjon, som vist i diskusjonskapitlet er det forskjellig vinkling som er optimal for forskjellige lokasjoner av solcellepaneler. Her bør det utforskes videre.



## 6 Konklusjon

Oppgavens problemstilling er å utforske muligheten for et «frittstående bøyekonsept med fornybar strømtilførsel for subseainstallasjoner». Resultatet av denne oppgaven er en sammensetning av flere komponenter og løsninger for å produsere strøm på en bøye, lagre overskuddet og forankre bøyen i tillegg til å overføre strømmen ned til et undervannsanlegg. Den endelige løsningen for problemstillingen består av store solcellepaneler på bøyen, batteripakke innebygd i bøyen og et forankringssystem kombinert med strømovertføring ned til undervannsanlegget.

Konklusjonen er at selv med et mye høyere krav for strømforbruk enn opprinnelig antatt, er problemstillingen gjennomførbar. Med beregninger for solceller, vindkraft og bølgekraft kunne vi fastslå at vi med god utnyttelse av bøyens radius kunne bruke solcellepaneler for å dekke energibehovet. Det viste seg også i beregningene at det er lønnsomt med ulike vinkler på solcellepanelene når vinklene har en maksimal differens på  $12^\circ$  avhengig av lokasjon.

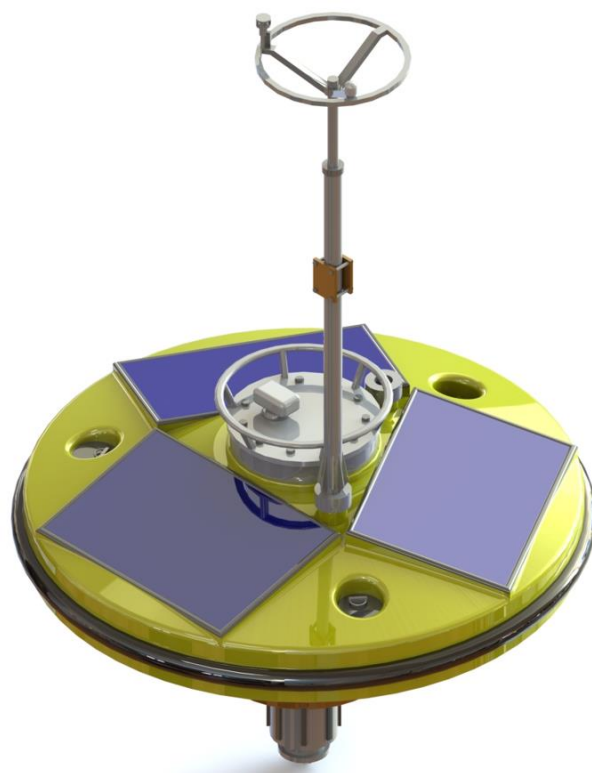
I vårt endelige konsept kom vi frem til 3 solcellepaneler med dimensjoner på  $140\text{cm} \times 91\text{cm}$  og en vinkel på  $15^\circ$  til horisontal. Som reserve energi bruker vi en batteripakke med en kapasitet på ca. 300Ah som skal kunne dekke strømforbruk på opptil 4 måneder som en ekstra sikkerhet. Som forankring blir det brukt et oppdriftsanker sammen med en EOM kabel, takket være deres respektive egenskaper som falsk havbunn og strøm- og signaloverføring.

Gjennom prosjektet har gruppen lært mye rundt det å løse en stor oppgave hvor krav og resultatmål endret seg mye i løpet av skrivingen. Gruppen har brukt flere egenskaper fra tidligere fag, veiledere, aktører i markedet og programvarer og satt disse i system. På bakgrunn av all kunnskap tilegnet og funnene gjort underveis, mener gruppen å ha designet et godt konsept for fornybar strømtilførsel for subseainstallasjoner.

## 6.1 Digital modell



*Figur 32 Ferdig digital illustrasjonsmodell 1*



*Figur 33 Ferdig digital illustrasjonsmodell 2*

# Kildeliste

Archer, CLA. (2005) Evaluation of global wind power. Tilgjengelig fra:

[https://web.stanford.edu/group/efmh/winds/global\\_winds.html](https://web.stanford.edu/group/efmh/winds/global_winds.html) (Hentet 14.04.2022)

Australian Government (2022). How Radar Works. Tilgjengelig fra:

[http://www.bom.gov.au/australia/radar/about/what\\_is\\_radar.shtml#:~:text=Radars%20send%20out%20electromagnetic%20waves,reflecting%20back%20to%20the%20radar.&text=In%20that%20same%20way%2C%20the,signal%20back%20to%20the%20radar.](http://www.bom.gov.au/australia/radar/about/what_is_radar.shtml#:~:text=Radars%20send%20out%20electromagnetic%20waves,reflecting%20back%20to%20the%20radar.&text=In%20that%20same%20way%2C%20the,signal%20back%20to%20the%20radar.) (Hentet: 17.03.2022)

Automatic Power (2019) *PMAPI-SC36-AIS*. Tilgjengelig fra:

<https://www.automaticpower.com/data-sheets/PMAPI-SC36-AIS-030119.pdf> (Hentet: 16.05.2022)

Copernicus Europe's eyes on Earth (2019) *Sunshine duration and clouds*. Tilgjengelig fra:

<https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019/sunshine-duration-and-clouds?fbclid=IwAR3PdVAGGk0aO7qg0HJOzCwk97mimkmAXPhb0tRitriCmgCj1SPWpC-7wF4> (Hentet 27.04.2022)

Deloitte (2015) *Smartphone batteries: better but no breakthrough* Tilgjengelig fra:

<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Technology-Media-Telecommunications/gx-tmt-pred15-smartphone-batteries.pdf> (Hentet: 04.05.2022)

Department of Energy, Solar Technologies Office (u.å) *How Does Solar Work*. Tilgjengelig fra: <https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work> (Hentet 27.04.2022)

Dricus De Rooij (2020) *Solar panel angle tilt calculation*. Tilgjengelig fra:

<https://sinovoltaics.com/learning-center/system-design/solar-panel-angle-tilt-calculation/> (Hentet: 03.05.2022)

EDF (2020) *All you need to know about wind power*. Tilgjengelig fra:

<https://www.edfenergy.com/for-home/energywise/all-you-need-to-know-about-wind-power#:~:text=How%20efficient%20is%20wind%20power,after%20going%20through%20the%20turbine.> (Hentet 16.05.2022)

Frye, D., Hamilton, A., Grosenbaugh, M., Paul, W., Chaffey, M. (2004) *Deepwater Mooring Designs for Ocean Observatory Science* (Rapport, Marine Technology Society Journal)

Tilgjengelig fra:

[https://www.researchgate.net/publication/233708158\\_Deepwater\\_Mooring\\_Designs\\_for\\_Ocean\\_Observatory\\_Science](https://www.researchgate.net/publication/233708158_Deepwater_Mooring_Designs_for_Ocean_Observatory_Science) (Hentet: 29.04.2022)

Grøn, Ø. (2022) virkningsgrad, *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra:

<https://snl.no/virkningsgrad> (Hentet: 04.05.2022)

Gunvaldsen, I., Mathiesen, S., Rosvold, K. A. (2021) batteri, *Store norske leksikon*.

Tilgjengelig fra: <https://snl.no/batteri> (Hentet: 04.05.2022)

Hofstad, KF. (2019) vindkraftverk, *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra:

<https://snl.no/vindkraftverk> (Hentet 14.04.2022)

Holtebekk, T., Pedersen, B., Haarberg, G. M., (2021) brenselcelle, *Store norske leksikon*.

Tilgjengelig fra: <https://snl.no/brenselcelle> (Hentet:04.04.2022)

J.M.K.C. Donev (2018). Betz Limit. Tilgjengelig fra:

[https://energyeducation.ca/encyclopedia/Betz\\_limit](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Betz_limit) (Hentet 14.04.2022)

Junwei, Y., Shaowei, Z., Wencai, Y., Yongzhi, X. and Huaining, G. (2020) *Design and Application of Buoy Single Point Mooring System with Electro-Optical-Mechanical (EOM) Cable*. (Article 2020, Journal of Marine Science and Engineering) Tilgjengelig fra:

<https://www.mdpi.com/2077-1312/8/9/672> (Hentet 29.04.2022)

Kilowatt-Hours (kWh) to Amp-Hours (Ah) Conversion Calculator (2022) Tilgjengelig fra:

<https://www.inchcalculator.com/kwh-to-ah-calculator/> (Hentet: 04.05.2022)

Klingenberg, M., Valle, M. (2021). *Elbiler med 800 volt-batteri kan ha kortere levetid*.

Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/elbiler-med-800-volt-batteri-kan-ha-kortere-levetid/510227> (Hentet: 18.05.2022)

Kollbein Bell, Runald Water Meyer, *elementmetoden*. Tilgjengelig fra:

<https://snl.no/elementmetoden> (Hentet: 14.04.2022)

M. Benghanern (2010) *Optimization of tilt angle for a solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia*. Tilgjengelig fra:

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191000396X?casa\\_token=MbI4aPHp-hsAAAAA:y6HSIU4vpm0i25LGmK3iWpflglq2zS1CJ-oyydO6ZNphdIoKIBZdX8okmGnGBDeHCfd4Oic7Lw](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191000396X?casa_token=MbI4aPHp-hsAAAAA:y6HSIU4vpm0i25LGmK3iWpflglq2zS1CJ-oyydO6ZNphdIoKIBZdX8okmGnGBDeHCfd4Oic7Lw) (Hentet 03.05.2022)

Mamun, M.A.A. Islam, M. Hasanuzzaman, J.S. (2022) *Effect of tilt angle on the performance and electrical parameters of a PV module: Comparative indoor and outdoor experimental investigation*. Tilgjengelig fra:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123321000179> (Hentet 29.04.2022)

Nygaard, LN (2016) Spør en forsker: Hvor blir det av bølgeenergien?, *forskning.no*.

Tilgjengelig fra: <https://forskning.no/alternativ-energi-havforskning-spor-en-forsker/spor-en-forsker-hvor-blir-det-av-bolgeenergien/378374> (Hentet 14.04.2022)

Pixabay (2015) *wave-ocean-sea-water-tide-current*. Tilgjengelig fra:

<https://pixabay.com/vectors/wave-ocean-sea-water-tide-current-306989/> (Hentet: 22.04.2022)

Pixabay(2011) *earth-map-atlas-cartology-word*. Tilgjengelig fra:

<https://pixabay.com/photos/earth-map-atlas-cartology-world-11048/> (Hentet 13.05.2022)

Rigzone (ingen dato) *How do Mooring Systems Work*. Tilgjengelig fra:

[https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight\\_id=358](https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=358) (Hentet 16.05.2022)

SEG-Automotive (2021) *Mild Hybridization: Overview of functions, benefits and fields of application*. Tilgjengelig fra:

<https://www.seg-automotive.com/48v/mild-hybrid-technology/> (Hentet: 04.05.2022)

SVB (2022) *Everything there is to know about AIS*. Tilgjengelig

fra: <https://www.svb24.com/en/guide/ais.html#:~:text=Class%20A%20AIS%20transceivers%20have,equipment%20used%20on%20recreational%20craft>. (Hentet: 27.04.2022)

Tom Burden (2021). *Selecting a Radar Reflector*. Tilgjengelig fra:

<https://www.westmarine.com/WestAdvisor/Selecting-a-Radar-Reflector#:~:text=RTEs%20work%20by%20reflecting%20radar,see%20where%20the%20lanes%20are>. (18.03.2022)

Ullman, DGU. (2010) *The mechanical design process*. Fjerde utgave. Tilgjengelig fra: <http://160592857366.free.fr/joe/ebooks/Mechanical%20Engineering%20Books%20Collection/MACHINE%20DESIGN/The%20Mechanical%20Design%20Process.pdf> New York: McGraw-Hill. (Hentet: 16.04.2022)

University for Michigan (2021) *Photovoltaic energy factsheet*. Tilgjengelig fra: <https://css.umich.edu/factsheets/photovoltaic-energy-factsheet#:~:text=PV%20conversion%20efficiency%20is%20the,that%20is%20converted%20to%20electricity.&text=Though%20most%20commercial%20panels%20have,cells%20with%20efficiencies%20approaching%2050%25>. (Hentet: 29.04.2022)

Wikipedia (2022) *Divide-and-conquer algorithm*. Tilgjengelig fra: [https://en.wikipedia.org/wiki/Divide-and-conquer\\_algorithm#:~:text=A%20divide%2Dand%2Dconquer%20algorithm,solution%20to%20the%20original%20problem](https://en.wikipedia.org/wiki/Divide-and-conquer_algorithm#:~:text=A%20divide%2Dand%2Dconquer%20algorithm,solution%20to%20the%20original%20problem). (Hentet: 16.04.2022)

Wikipedia (2022) *Solar irradiance*. Tilgjengelig fra: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_irradiance#:~:text=Average%20annual%20solar%20radiation%20arriving,level%20on%20a%20clear%20day](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_irradiance#:~:text=Average%20annual%20solar%20radiation%20arriving,level%20on%20a%20clear%20day). (Hentet: 29.04.2022)

Wikipedia (2022) *Wave Power*. Tilgjengelig fra: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power) (Hentet 14.04.2022)

Wikipedia (2022) *Wind Power*. Tilgjengelig fra: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power) (Hentet: 14.04.2022)

Wikipedia (2022). *Automatic identification system*. Tilgjengelig fra: [https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic\\_identification\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_identification_system) (Hentet: 04.04.2022)