# Høgskulen på Vestlandet

## Bacheloroppgave Maskin (ING3039)

ING3039-BAC-2021-VÅR-FLOWassign

### Predefinert informasjon

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Startdato:** | 28-01-2021 09:00 | **Termin:** | 2021 VÅR |
| **Sluttdato:** | 21-05-2021 12:00 | **Vurderingsform:** | Norsk 6-trinns skala (A-F) |
| **Eksamensform:** | Bacheloroppgave | | |
| **SIS-kode:** | 203 ING3039 1 BAC 2021 VÅR | | |
| **Intern sensor:** | (Anonymisert) | | |

### Deltaker

| | |
|---|---|
| **Navn:** | Tommy Bagne Blikshavn |
| **Kandidatnr.:** | 208 |
| **HVL-id:** | 577056@hvl.no |

### Informasjon fra deltaker

| | |
|---|---|
| **Tittel *:** | Offshore Vind til Ammoniakk |
| **Antall ord *:** | 9509 |
| **Engelsk tittel *:** | Offshore Wind to Ammonia |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Sett hake dersom besvarelsen kan brukes som eksempel i undervisning?:** | Ja | **Egenerklæring *:** | Ja |
| **Jeg bekrefter at jeg har registrert oppgavetittelen på norsk og engelsk i StudentWeb og vet at denne vil stå på vitnemålet mitt *:** | Ja | **Inneholder besvarelsen konfidensielt materiale?:** | Nei |

### Gruppe

| | |
|---|---|
| **Gruppenavn:** | Enmannsgruppe |
| **Gruppenummer:** | 11 |
| **Andre medlemmer i gruppen:** | Deltakeren har innlevert i en enkeltmannsgruppe |

Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min *

Ja

Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? *

Nei

Er bacheloroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? *

Ja, Norce

# Offshore vind til ammoniakk

Bacheloroppgave utført ved Høgskolen på Vestlandet – Studie for ingeniørfag

Maskin, Prosess- og energiteknikk

Av: Tommy Bagne Blikshavn Kandidatnummer: 208

Haugesund Våren 2021

# BACHELORPROSJEKT

**Studenten(e)s navn:** Tommy Bagne Blikshavn

**Linje & Studieretning:** Maskiningeniør, Prosess- og energiteknikk

**Oppgavens tittel:** *Offshore vind til ammoniakk*

**Oppgavetekst:**

Det ligger stort potensial i offshore vind, inntil nå er det mest vanlige å transportere strøm til land via kabel.
Oppgaven har som formål å undersøke om det er hensiktsmessig og bærekraftig å bruke strøm fra vindturbin til produksjon av ammoniakk.

Oppgaven skal se på energi som kreves for dannelse av ammoniakk og sammenligne med tap i strøm kabel. Videre skal det ses på transportløsninger for henholdsvis ammoniakk og strøm.

Oppgaven skal gi en vurdering av teknologisk, praktisk og økonomisk gjennomførbarhet samt redegjøre for påvirkning for miljøregnskapet.

**Endelig oppgave gitt:** 26.februar 2021

**Innleveringsfrist:** 21.mai 2021 kl. 12.00

**Intern veileder:** Jorunn Stueland Nysted

**Ekstern veileder:** Antonie Oosterkamp

**Emailadresse:** anoo@norceresearch.no

**Godkjent av studieansvarlig:** Jorunn S. Nysted

**Dato:** 28/4-21

# FORORD

Rapporten er en del av emnet <<ING 3039 - Bachelorprosjekt>>, som er et obligatorisk emne i slutten av ingeniør studiene. Oppgaven blir skrevet ved Høyskolen På Vestlandet i Haugesund og utgjør 20 studiepoeng. Prosjektet består av denne rapporten, plakat, en muntlig presentasjon og en populær vitenskapelig artikkel. Alle delene utføres i løpet av våren 2021.

Emnet baserer seg på at studenten skal komme i kontakt med bedrift for tildeling av oppgave, ekstern veileder. Deretter tildeles en intern veileder fra høyskolen. Hensikten er å bruke kunnskap tilegnet fra årene på ingeniør studiet i en reell oppgave.

Oppgaven ble tildelt fra Norce, en forskningsinstitusjon i Haugesund.

Vil gjerne sette en stor takk til:

- Jorunn Stueland Nysted – Intern Veileder ved HVL
- Antonie Oosterkamp – Ekstern Veileder hos Norce

Haugesund, 4.juni 2021

Tommy Bagne Blikshaun

# SAMMENDRAG

Potensialet for offshore vindkraft er stort og med nye områder som Utsira Nord og Sørlige Nordsjø II kan store energibehov dekkes eller utnyttes for økonomiske gevinster.

Utvikling og undersøke muligheter vil være naturlige steg i denne sammenheng. Formålet med oppgaven er å finne energimengdene som kreves for dannelse av ammoniakk for å sammenligne dette med tapene som skjer når strøm blir sendt via kabel på havbunnen, samt undersøke mellomleddet til ammoniakk, hydrogen produksjon.

Rapporten skal kunne fastslå om ammoniakk produksjon kan være en bærekraftig løsning til offshore vindparker.

Ifølge beregningene og estimater gjort vil elektrisitet direkte til land ha klart minst tap etterfølgt av ammoniakk og hydrogen med størst tap. Verdiene som ligger i ammoniakk og hydrogen blir potensialet med lagring av energien samt transport muligheter.

Med områdene Utsira Nord 1500 MW og Sørlige Nordsjø II 3000 MW som utgangspunkt for produksjon ble det laget figurer til illustrasjon av energieffektivitet over de største leddene fra elektrisitet til lagring av væskeform. Med estimerte tap for elektrisitet 1-2%, hydrogen 64% og ammoniakk 48%.

Energi krav for å danne ammoniakk på 21,3 GJ/t $NH_3$ er relativt lav da den teoretisk ikke kan gå lavere enn forbrennings varmen til ammoniakk på18,6 GJ/t $NH_3$. Det største tapet, 40% forekommer gjennom elektrolysen for nødvendig hydrogen produksjon ved alkalisk metode.

Ammoniakk fremstår som ett godt alternativ i forhold til hydrogenproduksjon ved lagring i væskeform. Ammoniakk produksjon krever en ekstra prosess Haber-Boch, men det forekommer så store tap ved lagring av hydrogen at det fremstår fornuftig ut fra resultater. Alternativet for å unngå for store tap med hydrogen, blir å transportere direkte etter elektrolysen når hydrogenet fortsatt befinner seg i gassfase.

$CO_2$ utslippet viser seg å gå ned med 75% når strømmen kommer av fornybare kilder til hydrogen produksjon. Hvor utslippene kommer fra produksjon, transport og installasjon. Med elektrolyse ligger dette på 0,38 $tCO_2/tNH_3$.

Kostnader blir naturlig å sammenligne opp mot verdi, begge definert i øre/kWh. Kostnader for ammoniakk 261,2, hydrogen 268 og elektrisitet på 91. Verdien for ammoniakk har blitt estimert til 320, hydrogen pris i Norge 272 og elektrisitet har en salgs pris på 80,3 til forbruker i snitt gjennom 2020. Størst verdi blir da ammoniakk, etterfulgt av hydrogen. Elektrisitet vil det være tap med verdi på 80,3 kontra kostnader på 91.

Ammoniakk produksjon offshore fremstår som en fremtidig bærekraftig løsning til vindparker, spesielt hvis det er ønskelig å lagre energien offshore. Potensialet kan bli stort med videre utvikling av elektrolyse samt andre ledd i prosessen. Hydrogen produksjon kan være effektivt når det er tilrettelagt direkte transport til land etter gass dannelse. Ved å sende strøm direkte til land unngås store tap, spesielt rundt så store anlegg som er tatt i betraktning gjennom oppgaven.

# Abstract

The potential for offshore wind power is large and with new areas such as Utsira North and South North Sea II, storage energy needs can be covered or utilized for economic gains.

Development and exploring opportunities will be natural steps in this context. The purpose of this task is to find the amount of energy required for the formation of ammonia to compare this with the losses that ocur when the electricity is sent with subsea cable, as well as to investigate the intermediary for ammonia, hydrogen production.

This report should be able to determine whether ammonia production can be a sustainable soltuion for offshore wind farm.

According to calculation and estimates made, electricity directly to land will by far have the least loss followed by ammonia and hydrogen with the biggest loss. The values contained in ammonia and hydrogen is the potential for energy storage and transport opportunities.

With the areas Utsira North 1500 MW and South North Sea II 3000 MW as a starting point for production, figures were made to illustrate energy effieciency across the largest links from electricity to storage in liquid form. With estimated losses for electricity 1-2%, hydrogen 64% and ammonia 48%.

Energy required for generating ammonia is 21,3 GJ/t$NH_3$ are relatively low as it theoretically cannot og lower than the lower combustion heat of ammonia of 18,6 Gj/t$NH_3$. The largest loss, 40% occurs through electrolysis for necessary hydrogen production by alkaline method.

Ammonia appears to be a good alternative to hydrogen production when stored in liquid form. Ammonia production requires an extra process Haber-Boch, but there are such large losses when storing hydrogen that it make sense based on results. The alternative to avoid excessive losses with hydrogen, will be to transport it directly after the electrolysis as the hydrogen is still in gas phase.

$CO_2$ emissions appear to decreasy by 75% when the power comes from renewable sources for hydrogen production. Where the emissions come from production, transport and installation. With electrolysis, this is 0,38 t$CO_2$/t$NH_3$.

Costs are natural to compare against values, both defined in øre/kWh. Cost for ammonia 261,2, hydrogen 268 and electricity at 91. The value for ammonia has been estimated at 320, hydrogen price in Norway 272 and electricity has a sales price of 80,3 out to consumers on average through 2020. The greates value will then be ammonia, followed by hydrogen. Electricity will be a loss with a value of 80,3 versus costs of 91.

Ammonia production offshore appears to be a future sustainable solution for wind farms, especially if it is desirable to store the energy offshore. The potential can be great with further development of electrolysis as well as other stages in the process. Hydrogen production can be efficiently when direct to transport to land is faciliated after gas formation. Sending electricity directly to land avoirds large losses, especially around such large facilities that have been taken into account throughout the task.

# INNHOLDFORTEGNELSE

Forord ..... ii
Sammendrag ..... iii
Innholdfortegnelse ..... v
Figurliste ..... vii
Tabeller ..... viii
1. Innledning ..... 1
1.1 Norce ..... 1
1.2 Bakgrunn for oppgaven ..... 1
1.3 Målsetting for oppgaven ..... 1
1.4 Metoder og verktøy ..... 2
1.5 Avgrensninger og antagelser ..... 2
1.6 Oversikt over forkortelser ..... 3
2: Offshore Vind ..... 4
2.1 Vindturbin ..... 4
2.1.1 Nacellen ..... 5
2.1.2 Turbinblad ..... 5
2.1.3 Girkasse ..... 5
2.1.4 Generator ..... 5
2.1.5 Fundament ..... 6
2.1.6 Kabler til strømnett ..... 7
3: Offshore vindkraftpark ..... 8
3.1 Norsk Historikk for havind ..... 9
3.2 Eksisterende Offshoreparker ..... 10
3.2.1 Hywind Skottland ..... 11
3.3 Planlagte OffshoreParker i Norge ..... 12
3.3.1 Utsira Nord ..... 13
3.3.2 Sørlige Nordsjø II ..... 14
3.4 Eksisterende Strømmetoder ..... 15
3.4.1 Vekselstrøm ..... 15
3.4.2 Likestrøm ..... 15
3.4.3 Strømtap ..... 16
3.5 Vindparker Kostnad ..... 17

4: Hydrogen fremstilling ved Elektrolyse ..... 19
4.1 Beregninger ..... 20
5: Nitrogen fremstilling ..... 22
5.1.1 Kryogenisk luft seperasjon ..... 22
5.2 Nitrogen Beregninger ..... 24
6: Ammoniakk Prosess ..... 26
6.1 Bruksområder ..... 26
6.2 Ammoniakk Fremstilling ..... 26
6.3 Beregninger ..... 28
6.3.1 Utsira Nord: ..... 29
6.3.2 Sørlige Nordsjø II: ..... 29
6.4 Tap ..... 30
6.5 Produksjons Kostnader Hydrogen og ammoniakk ..... 32
7: Ammoniakk Lagring/Transport ..... 33
7.1 Lagrings Kostnad ammoniakk og hydrogen ..... 35
8: Oversikt resultater ..... 36
9: Diskusjon og forslag til videre arbeid ..... 37
9.1 Diskusjon ..... 37
9.2 Forslag til videre arbeid ..... 38
10: Konklusjon ..... 39
11: Referanseliste ..... 40

# FIGURLISTE

Figur 1 Standard Vindmølle (Wordpress, 2016) ..... 4
Figur 2 Prinsippskisse for innside av nacellen (Funkjoker23, 2011) ..... 5
Figur 3 Illustrasjon Flytende Vindturbiner (Midttun, 2020) ..... 6
Figur 4 Illustrasjon Bunnfaste vindturbiner (Midttun, 2020) ..... 6
Figur 5 Kostnad-Distanse Analyse (Ramadan, 2012) ..... 7
Figur 6 Vindkraftpark (Recharge, 2020) ..... 8
Figur 7 Plattform drevet av offshore vindpark (Equinor, 2021) ..... 10
Figur 8 Offshore Vindkraft kapasitet i Norge (Irena, 2020) ..... 10
Figur 9 Vindkraft kapasitet i Norge (Irena, 2020) ..... 10
Figur 10 Hywind Skottland, utenfor Storbritannia (Equinor, 2021) ..... 11
Figur 11 Vindturbiner Skottland Hywind (Equinor, 2021) ..... 11
Figur 12 Utsira Nord og Sørlige Nordsjø II (NVE, 2020) ..... 12
Figur 13 Utsira Nord Kart (NVE, 2020) ..... 13
Figur 14 Sørlige Nordsjø II Kart (NVE, 2020) ..... 14
Figur 15 Overførings tap (Ramadan, 2012) ..... 16
Figur 16 Vindpark Kostnader (Catapult, 2018) ..... 17
Figur 17 Energikostnad Sørlige Nordsjø II (NVE, 2019) ..... 18
Figur 18 Alkalisk metode (Collin Smith, 2019) ..... 20
Figur 19 PEM Metode (Collin Smith, 2019) ..... 20
Figur 20 Kryogenisk luft seperasjon system (Morgan, 2013) ..... 23
Figur 21 Nitrogenreduksjon til ammoniakk (Michael A. Shipman, 2016) ..... 27
Figur 22 Illustrert HB prosess, metan og elektrolyse for $H_2$ (Collin Smith, 2019) ..... 28
Figur 23 Energi krav for HB prosess (Véronique Dias, 2020) ..... 30
Figur 24 Energieffektivitet Fornybar Energi til ammoniakk Lagret ..... 31
Figur 25 Energieffektivitet Fornybar Energi til Hydrogen lagret (Morgan, 2013) ..... 31
Figur 26 Produksjons kostander oversikt (Véronique Dias, 2020) ..... 32
Figur 27 Kjemiske egenskaper ammoniakk (Véronique Dias, 2020) ..... 33
Figur 28 Teoretisk fremstilling, Elektrolyseplattform (Viseth, tu.no/artikler, 2020) ..... 34
Figur 29 Lagring og transport kostnad ammoniakk (Véronique Dias, 2020) ..... 35

# TABELLER

Tabell 1 Oversikt over forkortelser ..... 3
Tabell 2 Data for kabler ..... 7
Tabell 3 Kostnad estimat vindkraftpark (Catapult, 2018) ..... 18
Tabell 4 Hydrogen Produksjon oversikt ..... 21
Tabell 5 Nitrogen Seperasjons-prosesser (Morgan, 2013) ..... 22
Tabell 6 Nitrogen Produksjon oversikt ..... 25
Tabell 7 Ammoniakk Produksjon Oversikt ..... 30
Tabell 8 Kostnads oversikt Ammoniakk og Hydrogen. Lagring og Transport ..... 35
Tabell 9 Energieffektivitet for UN og SNII. Elektrisk, Ammoniakk, Hydrogen ..... 36
Tabell 10 Totale tap for UN og SNII ..... 36
Tabell 11 Kostnads oversikt Produksjon, Lagring, Transport ..... 36
Tabell 12 Estimert Verdi Elektrisitet, ammoniakk og hydrogen ..... 36

# 1. INNLEDNING

## 1.1 NORCE

Oppgaven blir gjort i samarbeid med Norce (Norwegian Research Centre). Norce er ett av Norges største uavhengige forskningsinstitutter med over 700 ansatte i 10 norske byer, med stor faglig bredde og stor kunnskapsmiljøer. Norce leverer forskning og innovasjon innen energi, helse, klima, miljø, samfunn og teknologi.

Forskningsinstituttet som oppgaven blir samarbeidet med ligger sentralt i Haugesund, hvor ekstern veileder arbeider fra.

## 1.2 BAKGRUNN FOR OPPGAVEN

Fornybar energi er i enorm utvikling hvor offshore vindkraft utgjør ett stort potensial. Kapasiteten globalt i 1997 var 7,5 GW offshore og onshore, 2018 har dette steget til 564 GW (Irena, 2020) som reflektere global interesse for vindkraft. Utviklingen i Norge har nesten 6dobblet seg siden 2010 (423 MW) til 2019 (2 442 MW).

Dagens samfunn går mer mot fornybare metoder for å spare klimaet for høye utslipp av klimagasser og motivasjonen for å ta i bruk vind, vann og andre metoder er høy.

I Norge har vi allerede lang erfaring innen håndtering og arbeid offshore og dermed en verdifull kompetanse, noe som skaper en høy interesse og engasjement med å gå inn i utviklingen av fornybare metoder.

Utvikling og undersøke muligheter vil være naturlige steg i denne sammenheng.
Interessen bak denne oppgaven er å finne svar på om ammoniakk produksjon offshore kan være gunstig kontra strømkabel samtidig undersøke transport muligheter for ammoniakk gass.

## 1.3 MÅLSETTING FOR OPPGAVEN

Formålet med oppgaven er å finne energimengdene som kreves for dannelse av ammoniakk for å sammenligne dette med tapene som skjer når strøm blir sendt via kabel på havbunnen.

Rapporten skal kunne fastslå om ammoniakk produksjon kan være en bærekraftig løsning til offshore vindparker. I tillegg vil det bli undersøkt transportmuligheter for ammoniakken.

Resultat av rapporten vil gi nærmere indikasjon om dette er praktisk, økonomisk og miljøvennlig.

## 1.4 METODER OG VERKTØY

Gjennom ulike fagartikler og rapporter blir mye av den nødvendige dataen hentet. Forskningsrapporter blir svært relevant med tanke på at det er ett tema som er i tidlig utviklings fase og det ikke er alt for mye data rundt ammoniakk offshore, hydrogen offshore som må undersøkes.

Beregninger med kalkulator vil bli gjort for å undersøke potensialet i energidannelser og prosesser. Tegninger vil bli laget i Word for å illustrere på best mulig måte. Det har også blitt kontaktet firmaer og fagpersoner for mer direkte informasjon rundt visse emner, dette vil da bli oppgitt hvor det er blitt benyttet i rapporten.

## 1.5 AVGRENSNINGER OG ANTAGELSER

Avgrensninger er blitt satt i rapporten grunnet tid og ressurser til en slik omfattende oppgave. Det er omfattende forskning og data rundt offshore vindparker, vindturbiner, strøm, omdannelse til hydrogen og ammoniakk så det blir satt fokus områder på ammoniakk dannelse, nåværende metode for å håndtere strøm og transport for ammoniakk samt strøm. Avgrensninger og antagelser blir som følger:

- Effekt er satt til 10-12 MW per vindmølle.
- Forholdes til estimert produksjon for områdene Utsira Nord og Sørlige Nordsjø II.
- Hydrogen omdannelse blir integrert i ammoniakk prosessen.
- Haber-Boch prosessen blir brukt for ammoniakk produksjon.
- Strømtransport og tap tatt fra rapport med vindparker på 5MW.
- Fri tilgang med vann til prosesser.
- Alle enheter, forkortelser, kjemiske formler eller symboler antas å være allment kjent hvis ikke oppgitt nærmere kilde henvisning.

## 1.6 OVERSIKT OVER FORKORTELSER

TABELL 1 OVERSIKT OVER FORKORTELSER

| **Forkortelser** | **Betydning** |
|---|---|
| HVL | Høgskolen på Vestlandet |
| Offshore vind | Vindparker/Vindmøller som står ute til havs |
| DC | Vekselstrøm |
| AC | Likestrøm |
| Kinetisk Energi | Bevegelse energi (Vind energi) |
| GW | Gigawatt ($10^9$ Watt) |
| MW | Megawatt ($10^6$ Watt) |
| HVAC | Høyspent Vekselstrømoverføring |
| HVDC | Høyspent Likestrømoverføring |
| Onshore | På land |
| Offshore | Ute på havet/kysten |
| OED | Olje- og energidepartementet |
| ppb | Parts per million |
| $Nm^3$ | Normal kubikkmeter ($m^3$ gass med 0 °C og 1atm) |
| adatom | Enkelt atomer som ligger på krystalloverflater |
| UN | Utsira Nord |
| SØII | Sørlige Nordsjø II |
| LNG | Flytende Naturgass |
| LHV | Nedre Brennverdi (*Lower Heating Value*) |

# 2: OFFSHORE VIND

Med offshore vind kan vi utnytte bevegelsesenergi i vinden og gjøre om denne til ønsket energi eksempelvis elektrisitet. Denne prosessen blir gjort med mange steg og komponenter. Oppgaven skal redegjøre litt for disse komponentene og prosessen for å skape en oversikt. Det blir plassert vindturbiner på ett kartlagt område hvor det har blitt tatt målinger av snitt hastigheter for vind samt gjort rede for natur og miljø påvirkninger.

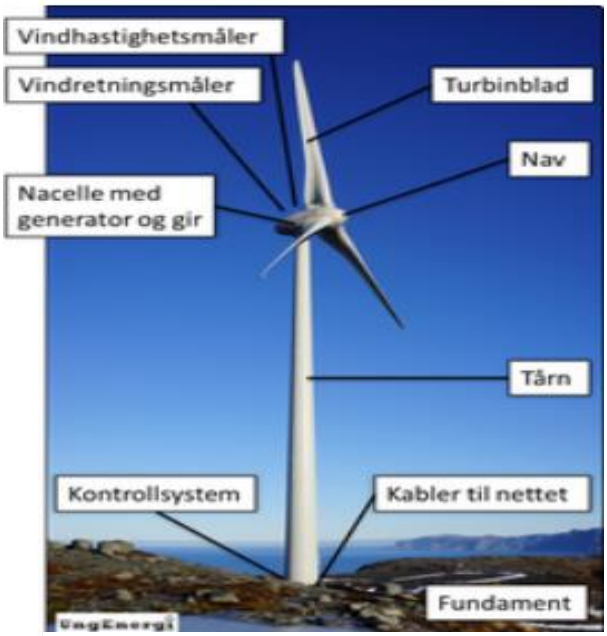
## 2.1 VINDTURBIN

Vindturbinens funksjon er å konvertere kinetisk vindenergi til tre fase AC elektrisk energi. Ifølge rapport fra (Catapult, 2018) koster en vindturbin som produserer 10 MW 119 million norske kroner, dette inkluderer da alt fra produksjon, testing og montering av vindturbinen. Offshore vindturbiner har også en tendens til å bruke større dimensjonerte vindturbiner fra 170-200 m på turbinbladene, selve høyden og varierte fundamenter. Det er viktig å utnytte at de kan stå isolert ute på havet i forhold til omgivelser som på land. Det ligger også fokus av å være selvdrevne og mest mulig vedlikeholdsfrie.

Standard vindturbiner starter å produsere strøm mellom 3-25 $\frac{m}{s}$ og når størst ytelse ved 13 $\frac{m}{s}$. Ved vindstyrker over 13 $\frac{m}{s}$ blir turbinbladene rotert aksialt slik at mindre av vindenergien blir fanget opp på turbinblad overflatene. (The Crown Estate, 2019).

Informasjon om vindmøllers oppbygning se Figur 1, som består av:

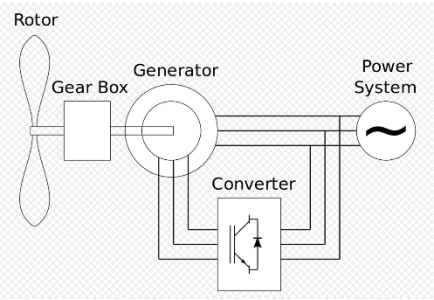
- Nacellen
- Turbinblad
- Girkasse
- Generator
- Fundament
- Kabler til nettet




FIGUR 1 STANDARD VINDMØLLE (WORDPRESS, 2016)

### 2.1.1 NACELLEN

Nacellen blir omtalt som selve hodet på vindturbinene se Figur 2. Inne i nacellen finnes de genererende komponentene til vindmøllene som girkasse, drivaksling, rotor, nav, generator og bremser. Det finnes også sensorer som måler vinkel og hastighet på vinden, dette for å optimalisere driften av vindturbinen. Typiske dimensjoner for en 10MW turbin er 20-25 m lang, 9-12 m brei, 7-9 m høy, med en masse på 400-500 tonn (The Crown Estate, 2019).




FIGUR 2 PRINSIPPSKISSE FOR INNSIDE AV NACELLEN (FUNKJOKER23, 2011)

### 2.1.2 TURBINBLAD

Vindturbinen består oftest av 3 blader. Bladene skal stå loddrett på vinden rotere nacellen ved hjelp av elektrisk strøm eller med hjelp av vinden. Bladene kan også rotere ifra nacellen for å oppnå gunstige vinkler på vinden. Blåser det plutselig med for store hastigheter vil det svare seg med mindre kontakt overflater.

### 2.1.3 GIRKASSE

Girkassen ligger plassert inni nacellen. Girkassen operer med en aksling som går rundt som følge av at turbinbladene spinner og skaper rotasjon. Girkassens funksjon blir å gjøre om moment fra vindturbinen. Den gjør mellom 5-15 rpm til 600 rpm for et medium girkasse og 1500 rpm for større girkasser. Dette blir definert som mekanisk energi, som blir kalt mellomleddet i prosessen hvor det skapes elektrisitet fra vindturbinene.

### 2.1.4 GENERATOR

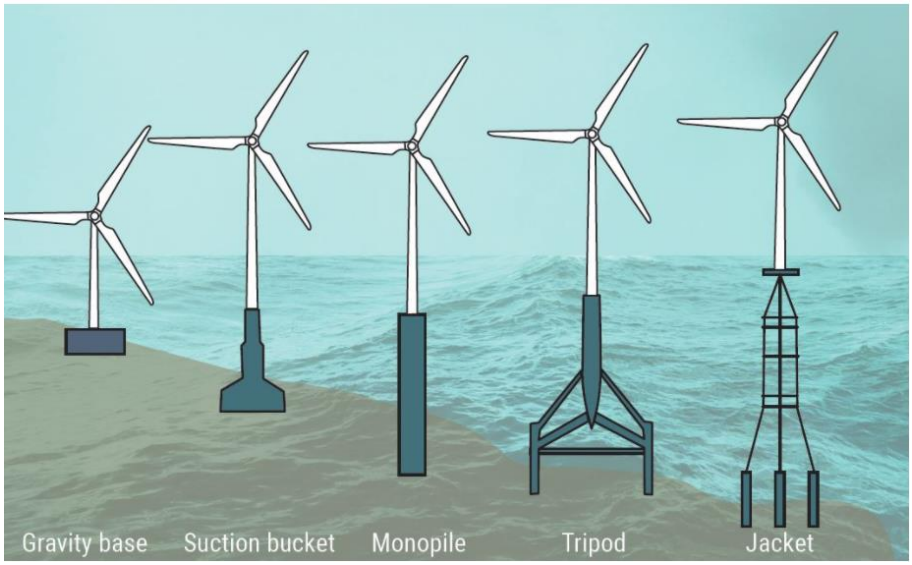
Generatoren ligger plassert inni nacellen, mottar mekanisk energi fra girkassen og har som oppgave å omgjøre dette til elektrisk energi ved elektromagnetisk induksjon for å videreføre dette til en ekstern elektrisk krets som transporterer strømmen til ønsket destinasjon.

### 2.1.5 FUNDAMENT

Offshore fundamenter deles ofte i to kategorier, bunnfast og flytende. Fundament på vindturbinene varierer spesielt i offshore sektoren hvor det kan brukes vindturbiner som går helt til havbunn, men også flytende til dybder større enn 60m. Det blir gjort vurderingen av områdene etter behov. Landbaserte fundamenter er blitt mer standardisert hvor det blir støpt fundament på stedet hvor vindturbinene skal stå, eller forankret i fjell.

FIGUR 3 ILLUSTRASJON FLYTENDE VINDTURBINER (MIDTTUN, 2020)

Flytende fundamenter Figur 3 blir brukt når dybder overskrider 60 m. Brukes forankring metode for å holde vindturbinen stasjonær, med flytende konstruksjoner som har lavt tyngdepunkt.




FIGUR 4 ILLUSTRASJON BUNNFASTE VINDTURBINER (MIDTTUN, 2020)

Bunnfaste fundamenter Figur 4 med varierte modeller. Ofte brukt når distanse til havbunn er mindre enn 60 m.

### 2.1.6 KABLER TIL STRØMNETT

Kablene er bygget opp av ledere i senter som transporterer strømmen, rundt lederne er det lagt isolasjon for kabelen, dette er spesielt viktig når kabelen skal gå under vann. Lederen i senter er ofte kopper eller aluminium. Kopper er bedre egnet material til å lede strøm, men er tyngre og dyrere. Aluminium blir derfor ofte valgt til strømnettene til offshore vindparker da det er snakk om store distanser.

Offshore kabler har sammenheng mellom kapasitet og størrelser, kabler visst i Tabell 2 (The Crown Estate, 2019). Skal det transporteres større mengder energi må det større kabler til.

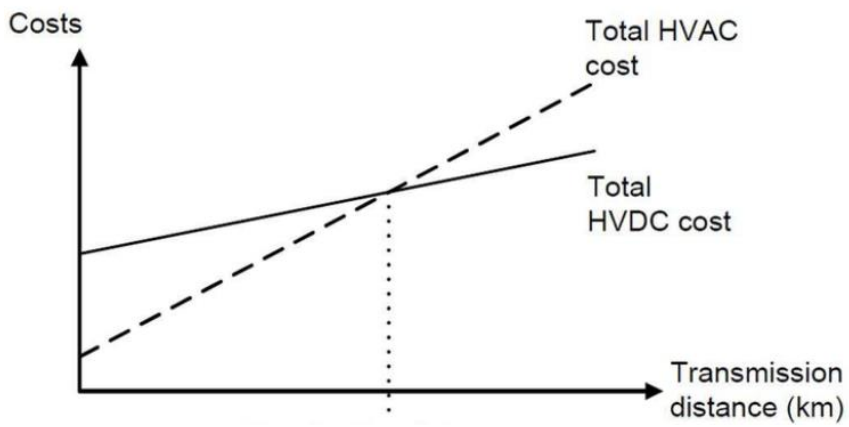
TABELL 2 DATA FOR KABLER

| | | | |
|---|---|---|---|
| kV (kilo volt) | 66 | 220 | 320 |
| Diameter (leder i mm) | 14 | 32 | 40 |
| Areal ($mm^2$) | 150-800 | 800-1600 | 1000-2500 |
| Isolasjon(mm) | 13 | 23 | 25 |

Strømnettet er bygget opp av kabler som går fra vindparken til transformatorstasjon for så til videre distribuering. Transformatorstasjonen står på et anlegg onshore som gjør om spenning fra ett nivå til et annet etter behov.

For undersjøisk kraftoverføring er blir valg av kabler mer beskrevet i kap3.4. Faktorer som bruksområder, overføringsavstand og overføringskapasitet er punkter som spiller en rolle.

Økonomi spiller som regel en avgjørende rolle i prosjekter. Figur 5 viser kostnad over distanse med hensyn på valg av kabler HVAC og HVDC. Det blir et skjæringspunkt mellom 80-100km (The Crown Estate, 2019) hvor det er mer økonomisk på bytte fra HVAC til HVDC.




FIGUR 5 KOSTNAD-DISTANSE ANALYSE (RAMADAN, 2012)

# 3: OFFSHORE VINDKRAFTPARK

Offshore vindkraft i Norge er interessant, spesielt da det foreligger stor kompetanse allerede fra olje og gass industrien som kan brukes. Dette er kanskje noe av grunnen for Norge hadde verdens første flytende vindturbin. (NVE, 2020)

Vindkraftparker består hovedsakelig av flere vindturbiner koblet sammen i serie på ett område. Med Offshore vindkraftparker menes det at vindturbinene står til havs. Offshore vindparker gir muligheter til større områder med lav interesse konflikt enn hva som er tilgjengelig på land. Områdene gir stabile samt sterke vindressurser. Figur 6 viser en illustrasjon fra en dansk vindkraftpark i Nordsjøen.

I Norge befinner offshore vindkraftparker seg fortsatt i en begynner fase hvor Equinor er de første som prøver seg frem med større prosjekter, mer om i kapittel 3.2. Det er også satt opp områder Utsira Nord og Sørlige Nordsjø II kapittel 3.3 som fra 1 januar 2021 er satt til konsesjonsbehandling.
Utsira Nord og Sørlige Nordsjø II er vindkraftparkene som vil bli brukt som eksempler når det skal ses videre på distanser og mulige plasseringer for å erstatte strømkabler med ammoniakk produksjon.

FIGUR 6 VINDKRAFTPARK (RECHARGE, 2020)

## 3.1 NORSK HISTORIKK FOR HAVIND

2006: Havvind ble først nevnt i stortingsmelding om norsk klimapolitikk. Det blir nevnt at det skal etableres en nasjonal strategi for elektrisk produksjon til havs.

2010: Havenergiloven kom. 15 mulige områder ble identifisert.

2012/2013: NVE utarbeidet en strategisk konsekvensutredning for havvind. De 15 nevnte områdene ble utredet med tanke på mulige konflikter

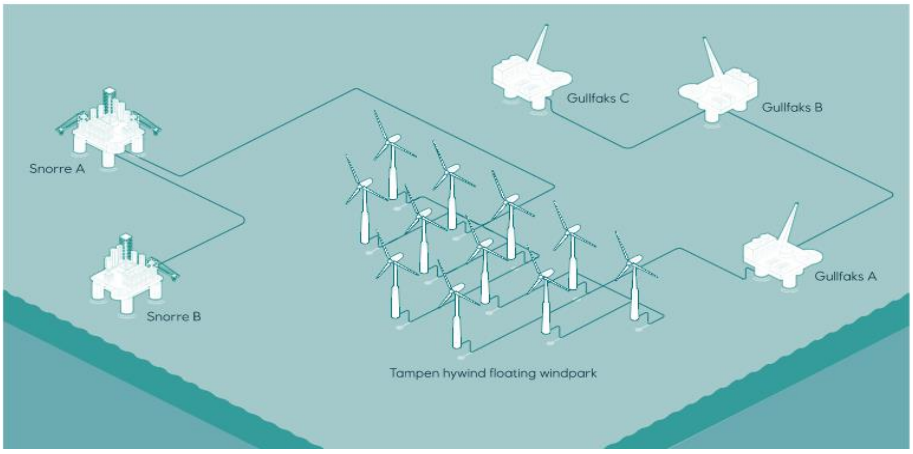
2018: NVE ble bedt om å vurdere endringer på områdene som tidligere har blitt vurdert fra 2012. Det ble vurdert at det ikke har skjedd vesentlige endringer av betydning. Utsira nord og Sørlige Nordsjø II blir anbefalt som utredningsområder av NVE.

2019: Regjeringer foreslår å åpne to områder for bygging av havvind. Sandskallen Sørøya nord og Utsira nord. I tillegg ble det bedt om innspill for åpning av Sørlige Nordsjø II

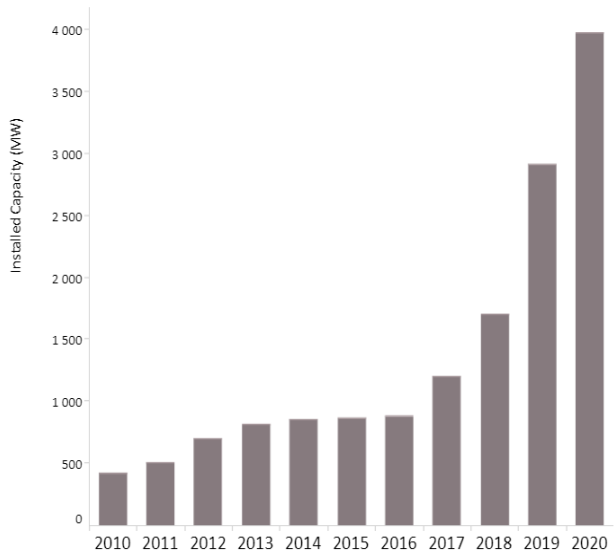
2020: I juni 2020 blir det åpnet for søking om konsesjon for havvind på Utsira Nord og Sørlige Nordsjø II. Samlet kan det gis konsesjon for 4 500 MW vindkraft. (NVE, 2020)

## 3.2 EKSISTERENDE OFFSHOREPARKER

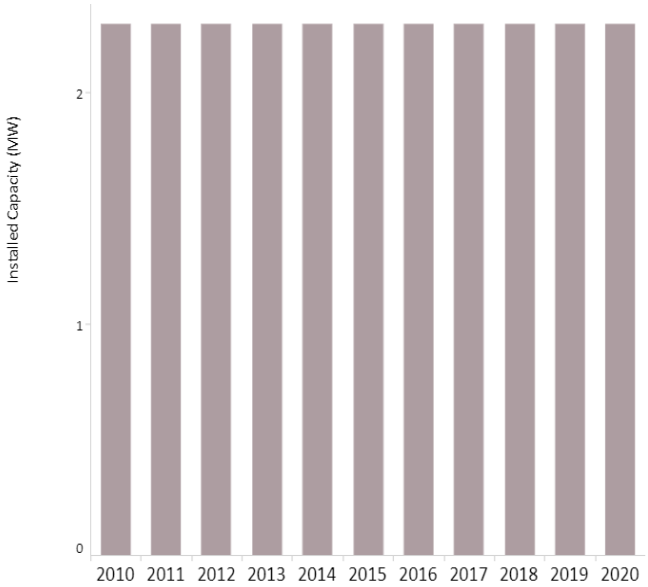
Offshoreparker i Norge er ikke fult realisert ennå, det finnes planer og prototyper som står per dags dato offshore. Equinor har planer om å utvikle Norges første flytende havvindpark som skal levere fornybar kraft til olje- og gassinstallasjoner til havs. Plattformene Snorre og Gullfaks illustrasjon i Figur 7 skal ifølge equinor være de første plattformene drevet av en flytende havvindpark.




Figur 7 Plattform drevet av offshore vindpark (Equinor, 2021)




**FIGUR 9 VINDKRAFT KAPASITET I NORGE (IRENA, 2020)**

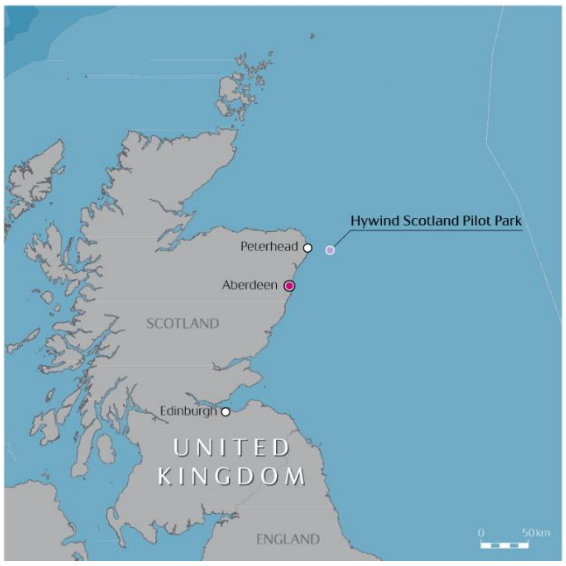



**FIGUR 8 OFFSHORE VINDKRAFT KAPASITET I NORGE (IRENA, 2020)**

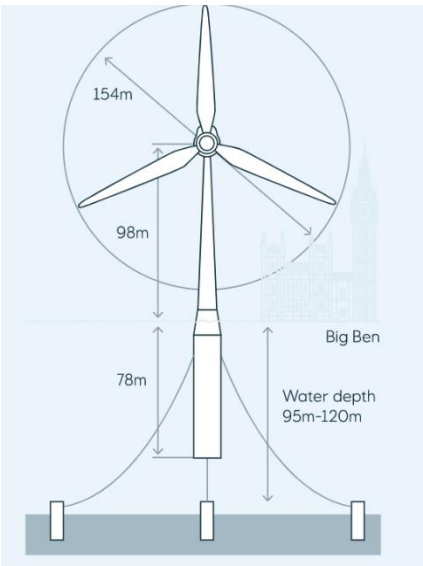
Interessen for vindkraft er økende. Figur 9 Vindkraft kapasitet i Norge (Irena, 2020) viser at den installerte kapasiteten har økt siden 2010 og det har vært en spesielt stor økning fra 2017-2020. Offshore vindkraft er ikke blitt helt realisert pr dags dato i Norge ennå, kan bare anta økning i fremtiden.

### 3.2.1 HYWIND SKOTTLAND

Equinor og deres samarbeidspartner Masdar har allerede en etablert vindkraftpark utenfor Skottland, Figur 10 Hywind Skottland, utenfor Storbritannia. Hywind Skottland ligger på ett område kalt *Peterhead* 29 km utenfor Skottlands kyst.




**FIGUR 10 HYWIND SKOTTLAND, UTENFOR STORBRITANNIA (EQUINOR, 2021)**

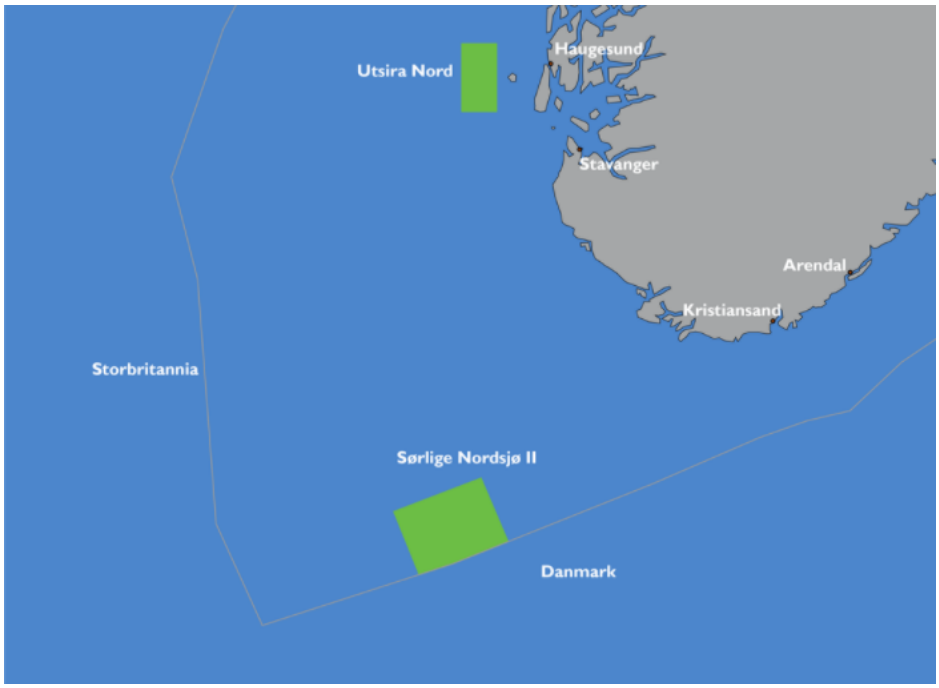



**FIGUR 11 VINDTURBINER SKOTTLAND HYWIND (EQUINOR, 2021)**

Anlegget har fem 6 MW flytende vindturbiner illustrert i Figur 11, med total kapasitet på 30 MW. Kabelen som går til land, er rundt 30 km lang med overføringspenning på 33 kv. Prosjektet totalt har kostet 2 milliard NOK. (Equinor, 2021)

## 3.3 PLANLAGTE OFFSHOREPARKER I NORGE

Olje og- energi departementet har åpnet opp to nye områder til havenergi Utsira Nord og Sørlige Nordsjø II. 1 januar 2021 åpnet områdene for konsesjonsbehandling. Disse områdene vil bli brukt til potensielle områder til ammoniakk produksjon videre i oppgaven.




Områdene UN og SNII i Figur 12 er merket ut med grønt og kan i fremtiden potensielt bli utfylt med vindturbiner.

FIGUR 12 UTSIRA NORD OG SØRLIGE NORDSJØ II (NVE, 2020)

For områdene kan det ses på mulige antall vindturbiner, distanse mellom hver enkel vindturbin for å minimisere turbulens som kommer av vind da den har passert bladene.

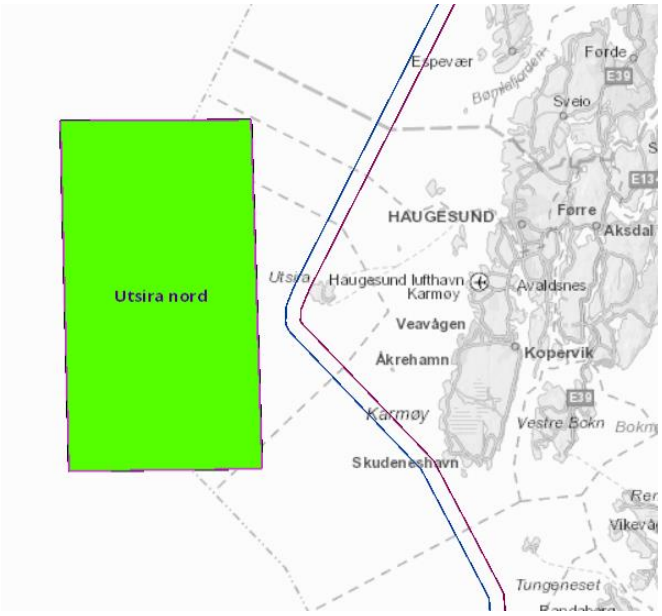
I følge NREL (National renewable energy labratory) blir det anslått 4 MW pr kvadrat kilometer. Dette vil tilsvare Utsira Nord med 12 MW vindturbiner kan ha maks 336 vindturbiner og Sørlige Nordsjø II maks 863 stk. Med tall fra Myndighetene og Statnett hvor områdene har fått konsesjon for 4500 MW, vil det tilsvare antallet 125 på Utsira Nord og 250 på Sørlige Nordsjø II (NVE, 2020).

Hywind Demo er ett prosjekt hvor det har stått en vindturbin på 2,3 MW på Karmøy, ut ifra målinger over flere år. Equinor har registrert en kapasitetsfaktor på 50% (Equinor, 2021). Utnyttelsen av det geografiske område, med varierte vindhastigheter gir en 50% årlig produksjons muligheter.

Det blir tatt utgangspunkt i denne kapasitetsfaktoren for UN og SNII, da spesielt UN har en del geografiske likheter.

### 3.3.1 Utsira Nord

Utsira Nord ligger langs kysten vest av Utsira og Haugalandet. Figur 13 viser til geografisk plassering av Utsira Nord. Område egner seg for flytende vindkraft. Det er allerede blitt plassert en vindturbin prototype for innsamling av data på område. Øst for område ligger også øya Utsira som kan bli sett på til assistanse av ammoniakk produksjon med fri tilførsel av vann eller ønsket lagring. Statnett har anslått område til 1500 MW med vind produksjon (Statnett, 2020). Distanse til land Tabell 3 tilsier at tilknytting til land vil bli gjort via HVAC forbindelser.




**Figur 13 Utsira Nord Kart (NVE, 2020)**

Estimert antall vindturbiner:

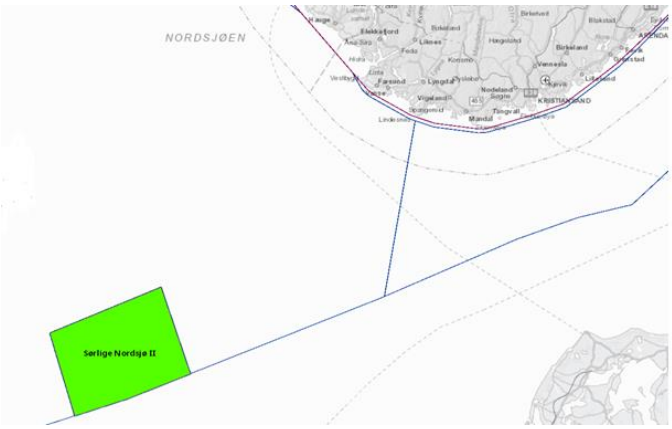
$$\frac{1500\text{MW}}{12\text{MW}} = 125 \text{ Stk}$$

Årlig produksjon med 50% kapasitetsfaktor for UN:

$$1500 \text{ MW} * 24 \text{ h} * 365 \text{ d} * 0{,}5 = 6{,}5 \text{ TWh}$$

### 3.3.2 SØRLIGE NORDSJØ II

Sørlige Nordsjø II ligger mellom Norge og Danmark Figur 14 noe som gjør det aktuelt for eksport av kraft. Området egner seg for faste og flytende fundamenter. Statnett har anslått område til 3000 MW med vind produksjon (Statnett, 2020). Distansen til land Tabell 3 tilsier at tilknytning vil blir gjort via HVDC-forbindelser.




Estimert antall vindturbiner:

$$\frac{3000\ \text{MW}}{12\ \text{MW}} = 250\ \text{Stk}$$

Årlig produksjon med 50% kapasitet for SNII:

$$3000\ \text{MW} * 24\ \text{h} * 365\ \text{d} * 0{,}5 = 13\ \text{TWh}$$

FIGUR 14 SØRLIGE NORDSJØ II KART (NVE, 2020)

TABELL 3 DATA FOR UTSIRA NORD OG SØRLIGE NORDSJØ II (NVE, 2020)

| | Utsira Nord | Sørlige Nordsjø II |
|---|---|---|
| Effekt (MW) | 1500 | 3000 |
| Estimert kortest distanse til land (km) | 30 | 141 |
| Området ($km^2$) | 1010 | 2591 |
| Vurderte Fundament | Flytende | Flytende og Faste |
| Maks antall Vindturbiner | 336 | 863 |
| Konsesjons antall Vindturbiner | 125 | 250 |
| Årlig produksjon (TWh) | 13 | 26 |
| Kapasitetsfaktor | 50% | 50% |

## 3.4 EKSISTERENDE STRØMMETODER

Det finnes hovedsakelig to metoder i dag for å sende strømmen fra generatorene ute med vindparken inn til land, likestrøm og vekselstrøm. Begge har fordeler og ulemper avhengig av distanser, bruk, effektbehov og økonomi. Distansen for UN og SNII vil det kunne vurderes at det er hensiktsmessig med både veksel og likestrøm samt forskjellige type kabel strategi når distansen for områdene er veldig forskjellige.

### 3.4.1 VEKSELSTRØM

Vekselstrøm er gunstig for korte avstander og nærliggende områder. HVAC (High Voltage Alternating Current, spenning fra 65 kV og oppover) har stor kapasitans. Ved lengre distanser vil kabelen levere en stor del reaktive effekt på grunn av faseforskyvninger mellom strøm og spenning. Den reaktive effekten kommer hovedsakelig av kabelens kapasitet og frekvens, desto høyere frekvens desto høyere tap.

Vekselstrøm brukes ofte på distanser mindre enn 50 til 60 km. Vekselstrømoverføring krever tre ledere med normalt sett kapasitet mellom 132-245 kV som kan eksportere 350-400MW per kabel. (The Crown Estate, 2019). Kabler med kapasitet på 220 kV har blitt mer standardisert for vindparker som tar i bruk vekselstrøm.

### 3.4.2 LIKESTRØM

Selve kabelanlegget med likestrøm er rimeligere sammenliknet med vekselstrøm da det er nok med en eller to ledere. HVDC (High Voltage Direct Current) har mindre effekttap enn høyspent vekselstrøm (HVAC) da tapene bare finnes over ohmsk motstand. Men strømmen må gjøres om da den mottas til land og transformatorer ved høyspent er ikke fornuftig før distansene blir større enn 80-100 km illustreres med graf i Figur 5. For ett HVDC system kan en leder kabel med kapasitet på 320 kV eksporter opp til 1200 MW.

<< På korte distanser vil prisen på stasjonene og tapene favorisere AC, men jo lenger kabelen er, og jo høyere effekt som skal overføres vil DC være billigere. Spesielt gjelder dette under vann hvor tapene i en AC-kabel i form av varmeutvikling i lederen og eventuelt indusert tap i armering, blir mye høyere enn ved luftstrekk.>> (Odd Richard Valmot, 2017)

### 3.4.3 STRØMTAP

Overføringstap avhenger av lengde og transporteffekt. En studie utført fra Negra, Todovic og Ackermann har beregnet tap for spesifikke vindparker med snitt vindhastighet på 9 m/s, 500 og 1000 MW effekt. Det ble brukt tre forskjellige volt for transport 132 KV, 220 KV og 400 KV. Det blir videre nevnt at 220 KV og 400 KV er gunstig på lengre distanser for mindre tap.

Overførings tap har blitt kalkulert som: $l_{\%} = \frac{(\sum_i^N P_{lost,i} * P_i) * h * a}{(\sum_i^N P_{gen,i} * P_i) * h * a}$

Figur 15 er hentet fra studiene til Negra, Todovic og Ackermann og viser overføringstap fra HVAC og HVDC for et 1000 MW vindkraftanlegg ved distanser fra 50-200km. Det nevnes forkortelsen CS i figuren, med dette menes det transmisjonssystem, som er omdannelse fra en strømform til en annen. Dette utgjør en stor andel av tapene samt store kostnader ved høyspente anlegg. Rutene merket grått er minste tap på de forskjellige distansene.

| 1000 MW | | | |
|---|---|---|---|
| | HVAC | HVDC LCC | HVDC VSC |
| Config. | 1000 MW (400 kV) | 440 + 600 MW CS | 3 x 350 MW CS |
| Nr Cables | 2 | 2 | 6 |
| at 50 km | 1,14 | 1,60 | 4,02 |
| at 100 km | 2,32 | 1,77 | 4,52 |
| Config. | 1000 MW (400 kV) | 2 x 600 MW CS | 3 x 350 MW CS |
| Nr Cables | 2 | 2 | 6 |
| at 150 km | 4,30 | 1,91 | 5,02 |
| Config. | 1000 MW (220 kV) | 2 x 600 MW CS | 2 x 500 MW CS |
| Nr Cables | 4 | 2 | 4 |
| at 200 km | 7,58 | 2,04 | 5,51 |

FIGUR 15 OVERFØRINGS TAP (RAMADAN, 2012)

For UN og SNII mer om områdene i kapittel 3.3 med distanser på 30 km og 141 km. Vil de da være foretrukket å bruke HVAC på Utsira Nord 30km og HVDC teknologi på Sørlige Nordsjø II 141 km.

Tapene er da bare inn til land og det vil forekomme større tap når strømmen skal videre, og strøm kan heller ikke lagres som også er en faktor å ta i betraktning. Det vil også være større tap når større energi mengder skal transporteres. UN og SNII har anslått større effekter enn 1000 MW, men det blir brukt disse dataene for estimat for tap.

På bakgrunn av Figur 15 og avstandene fra de to områdene og til land så brukes følgende tap til videre: Utsira Nord 1,14% og Sørlige Nordsjø II 1,91%.

Årlig produksjon vil disse tapene utgjøre:

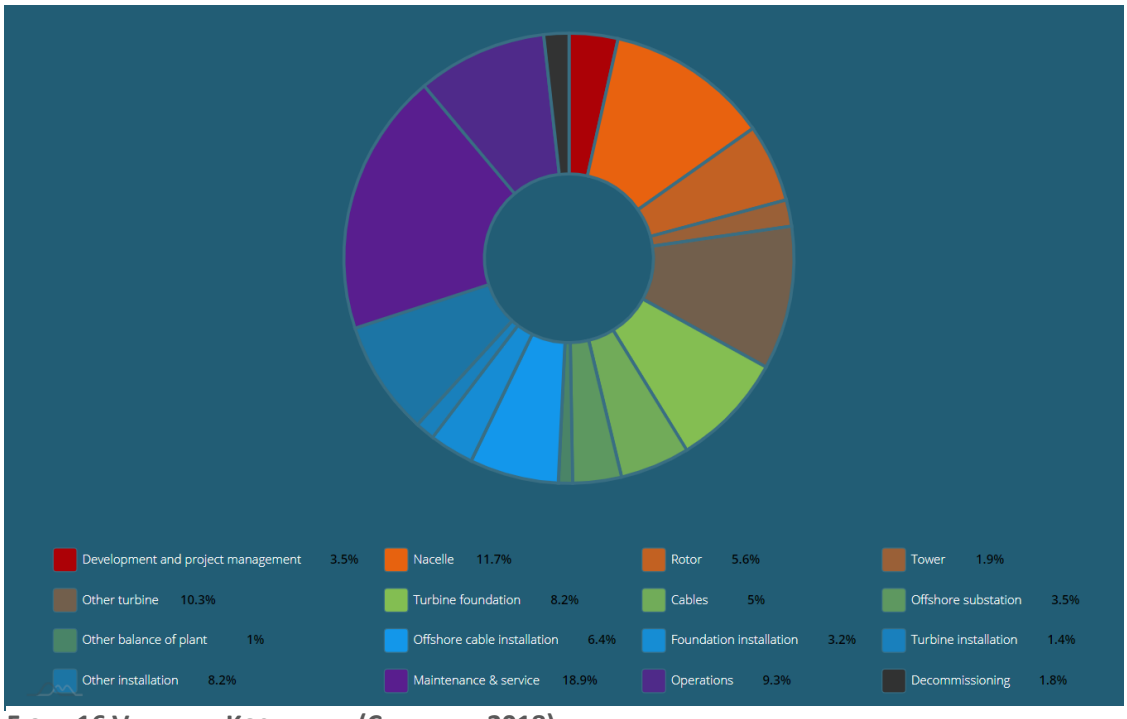
- Utsira Nord på 6,5 TWh → $\frac{6{,}5*10^{12}\ Wh * 1{,}14}{100} = 74{,}1\ GWh$
- Sørlige Nordsjø II 13 TWh → $\frac{13*10^{12}\ Wh * 1{,}91}{100} = 248{,}3\ GWh$

## 3.5 VINDPARKER KOSTNAD

En studier utført fra Negra, Todovic og Ackermann har beregnet tap for spesifikke vindparker. Hvor resultatene viser at vindkraftparker som er ≥500 MW med distanser opp til 55 km blir HVAC teknologi lavest kostnad for energi transport, når det forekommer lengre distanser brukes HVDC for lavest kostnad.

Med data fra Offfshore Renewable Energy Catapult viser det i Figur 16 oversikt over kostnads fordelingene for ett typisk vindparks prosjekt fra planleggingsfase, vedlikehold og avvikling av parken.

Priser kan variere med hensyn til utfordringer rundt utbygging av vindkraft parker.



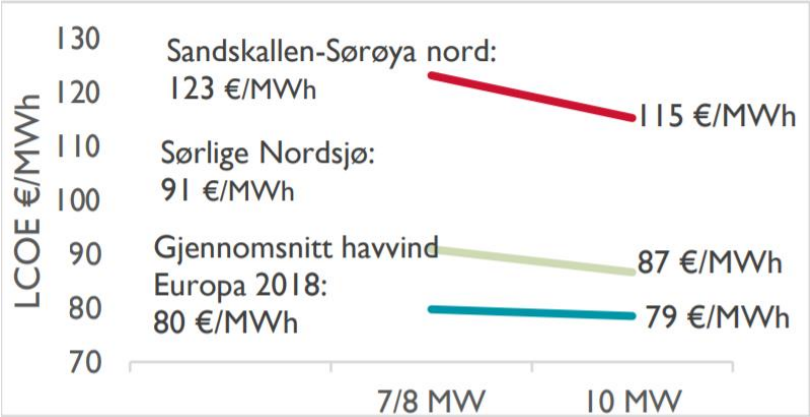

FIGUR 16 VINDPARK KOSTNADER (CATAPULT, 2018)

TABELL 3 KOSTNAD ESTIMAT VINDKRAFTPARK (CATAPULT, 2018)

| Kategori | Nok/MW |
|---|---|
| Utvikling og Prosjektledelse | 1 400 000 |
| Vindturbin | 11 550 000 |
| Kabler | 2 000 000 |
| Fundament(bunnfast) | 3 400 000 |
| Offshore strømnett | 1 400 000 |
| (Onshore strømnett) | (350 000) |
| Installasjon | 7 500 000 |
| Vedlikehold | 870 000 |
| Total Sum | 28 120 000 |

Fra Tabell 3 har det blitt tatt hensyn til dybde på 30 m, strømnett 60 km fra land. Tallene i Tabell 3 er blitt tatt ut ifra Figur 16 Figur 16 Vindpark Kostnader og skrevet ned som en forenklet versjon. Vindturbin har en kostnads fordeling: nacellen 40%, rotor 19%, tårn 7% og annet 34%.

Kostnader blir påvirket av vanndybde, avstand til land og størrelse på vindparker. Fra Figur 17 har energikostnad allerede blitt beregnet for Sørlige Nordsjø II, leser av figur for 10 MW vindturbiner 91 €/MWh (NVE, 2020). Noe som tilsvarer 91 øre/kWh.




FIGUR 17 ENERGIKOSTNAD SØRLIGE NORDSJØ II (NVE, 2019)

Utsira Nord har ikke noe tilsvarende data. Da det er nødvendig med flytende fundamenter pga. vanndybden for område.

Transport kostnader i Figur 29 er rør lengde på 250 km tatt i betraktning. Naturlig å legge til en kostnad på Figur 17 for å sammenligne. Distansen til SNII er 141 km Tabell 3, som utgjør en differanse på 109 km med kabel kostnad. For minst tap anbefalt i Figur 15 kabel HVDC LCC.

HVDC LCC kabel ved maks kapasitet koster 6 000 000 Nok/km. Som utgjør et tillegg på 65 400 000 Nok. Inkludert installasjon (Lazaridis, 2005).

# 4: HYDROGEN FREMSTILLING VED ELEKTROLYSE

Prosessen krever fri tilgang av vann, som vil bli ett utgangspunkt i oppgaven. Det finnes alternative metoder for utvinning av rent vann fra saltvann gjennom kokeprosesser og membran destillasjon. Utsira Nord har også lokale øyer i nærheten hvor det foreligger eksisterende vannløp.

Elektrolyse vil være metoden som blir brukt til å fremskaffe nødvendig hydrogen til ammoniakk prosessen. Det finnes forskjellige metoder for anskaffelse av hydrogen via elektrolyse. Elektrolyse er i konstant utvikling for økning av energieffektivitet og minimisere tapene over prosessen.

Gå fra metan til elektrolyse som dekker behovet av hydrogen vil også redusere $CO_2$ utslippet med 75% når strømmen kommer av fornybare kilder. $CO_2$ utslippet kommer fra produksjon, transport og installasjon og ligger på 0,38 $tCO_2/tNH_3$ med elektrolyse (Collin Smith, 2019).

Prosessen har utgangspunkt hvor strøm blir transportert til vannmengder, dette skaper en kjemisk endring i vannet. Vannet spaltes til hydrogen og oksygen.

Strøm til hydrogen: Elektrisk energi + vann → hydrogengass + oksygengass.

<<Vannelektrolyse er en velkjent teknologi som har vært benyttet i Norge i industriell skala, fra oppstarten av Norsk Hydros anlegg på Rjukan i 1940 og i Glomfjord fra 1953>> (Benjaminsen, forskning, 2019)

Ved vannelektrolyse spaltes vann ved å tilføre elektrisitet til hydrogen og oksygen. Når dette blir gjort med strøm fra solceller, vannkraft eller vindturbiner, blir det ‘’$CO_2$-fritt’’.

Når det tilføres spenning til vann for splitting til hydrogen og oksygen er elektrolyse i stand til å produsere 99,998% rent hydrogen. De to vanligste metodene som brukes for fremstilling er Figur 18 Alkalisk metode og Figur 19 PEM Metode proton utveksling membran. Det laveste teoretiske energimengden som kreves for fremstilling av hydrogenet er 39,4 kWh pr kilogram av hydrogen produsert (Morgan, 2013). I oppgaven brukes 55 kWh pr kilogram (NVE, 2020) for å skaffe en mer realistisk tilnærming. Det vil bli brukt 60% av strømmen produsert av offshore vindkraftparkene til elektrolysen.

$$2OH^-(aq) \xrightarrow{yields} {}^1/_2\, O_2(g) + H_2O(l) + 2e^-$$

$$2H_2O(l) + 2e^- \xrightarrow{yields} H_2(g) + 2OH^-(aq)$$

$$H_2O(l) + electrical\ energy \xrightarrow{yields} H_2(g) + {}^1/_2\, O_2(g)$$

FIGUR 18 ALKALISK METODE (COLLIN SMITH, 2019)

Alkalisk metode. Kjemisk ligning. Energieffektivitet på 51-60%, med tap på 14.2 $GJ/t_{NH_3}$ (Collin Smith, 2019) .

Øverst anode, katode til total reaksjon nederst.

$$H_2O(l) \xrightarrow{yields} {}^1/_2\, O_2(g) + 2H^+ + 2e^-$$

$$2H^+ + 2e^- \xrightarrow{yields} H_2(g)$$

FIGUR 19 PEM METODE (COLLIN SMITH, 2019)

Proton utveksling membran, Proton exchange membrane (PEM). Energieffektivitet på 46-60% men har en forventning å oppnå 75% i fremtiden (Collin Smith, 2019). Mulighet for fremtidig hydrogen produksjon.

Både PEM og alkalisk er praktiske metoder som er velbrukt innen elektrolyse. Alkalisk er den mest økonomiske metoden. (Collin Smith, 2019).

## 4.1 BEREGNINGER

Strømmen som går til Hydrogen($H_2$) produksjon blir 60% av kapasiteten til vindparkene. De resterende 40% brukes til Haber-Boch prosessen Kap6:, nitrogen fremstilling Kapittel 5: og annet.

Data:

- Molmasse: 2,02 g/mol → 0,00202 kg/mol
- Energi for omdanning: 55 kWh/kg $H_2$
- Utsira Nord Produksjon: 6,5 TWh
- Sørlige Nordsjø II Produksjon: 13 TWh
- Utnyttelse av produksjon: 60%
- Energi effektivitet med alkalisk metode på 60%

**Utsira Nord Maksimal hydrogenproduksjon:**

Med 60% av total anleggs kapasitet som innsats, blir maksimalt kg hydrogen produsert

$$\frac{6{,}5 * 10^9 \text{kWh} * 0.60}{\frac{55\text{kWh}}{\text{kg H}_2}} = 70\ 909\ 090{,}91\ \ \text{kg H}_2$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{70\ 909\ 090{,}91\ \text{kg H}_2}{2{,}02*10^{-3}\frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 3{,}510351035 * 10^{10}\ \text{mol}$$

Tilgjengelig energi etter blir 40% av vindkraftparkens kapasitet på 6,5 TWh

$$\frac{6{,}5\ \text{TWh} * 40}{100} = 2{,}6\ \text{TWh}$$

**Sørlige Nordsjø II Maksimal hydrogenproduksjon:**

Med 60% av total anleggs kapasitet som innsats, blir maksimalt kg hydrogen produsert

$$\frac{13 * 10^9 \text{KWh} * 0.60}{\frac{55\text{KWh}}{\text{kg H}_2}} = 141\ 818\ 181.8\ \text{kg H}_2$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{141\ 818\ 181.8\ \ \text{kg H}_2}{2{,}02*10^{-3}\frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 7{,}02070207 * 10^{10}\ \text{mol}$$

Tilgjengelig energi etter blir 40% av 13 TWh

$$\frac{13\ \text{TWh} * 40}{100} = 5{,}2\ \text{TWh}$$

Tabell 4viser energi mengder brukt til elektrolyse med 60% energi effektivitet, samt masse hydrogen produsert med avsatt 60% fra total elektrisitet fra vindkraftparken.

TABELL 4 HYDROGEN PRODUKSJON OVERSIKT

| Produksjon oversikt | Utsira Nord | Sørlige Nordsjø II |
|---|---|---|
| Hydrogen produsert (tonn) | 70 909 | 141 818 |
| Energi tilgjengelig (TWh) | 6,5 | 13 |
| Energi brukt (TWh) | 3,9 | 7,8 |
| Energi igjen (TWh) | 2,6 | 5,2 |

# 5: NITROGEN FREMSTILLING

Jordas atmosfære består av rundt 78% nitrogen. Det finnes forskjellige metoder for å utnytte dette.

De tre mest brukte metodene til anskaffelse av rent nitrogen(gass), data i Tabell 5 (Morgan, 2013).

- Kryogenisk destillasjon
- Polymer membran seperasjon
- *Pressure swing adsorption*

Kryogenisk destillasjon blir mest brukt og dekker 90% av produksjon innen disse metodene (Morgan, 2013). Fra rapport (Xiao-bin ZHANG, 2014) kan energibehovet for kryogenisk luft seperasjon komme ned til 0,38 KWh/$m^3$.

**TABELL 5 NITROGEN SEPERASJONS-PROSESSER (MORGAN, 2013)**

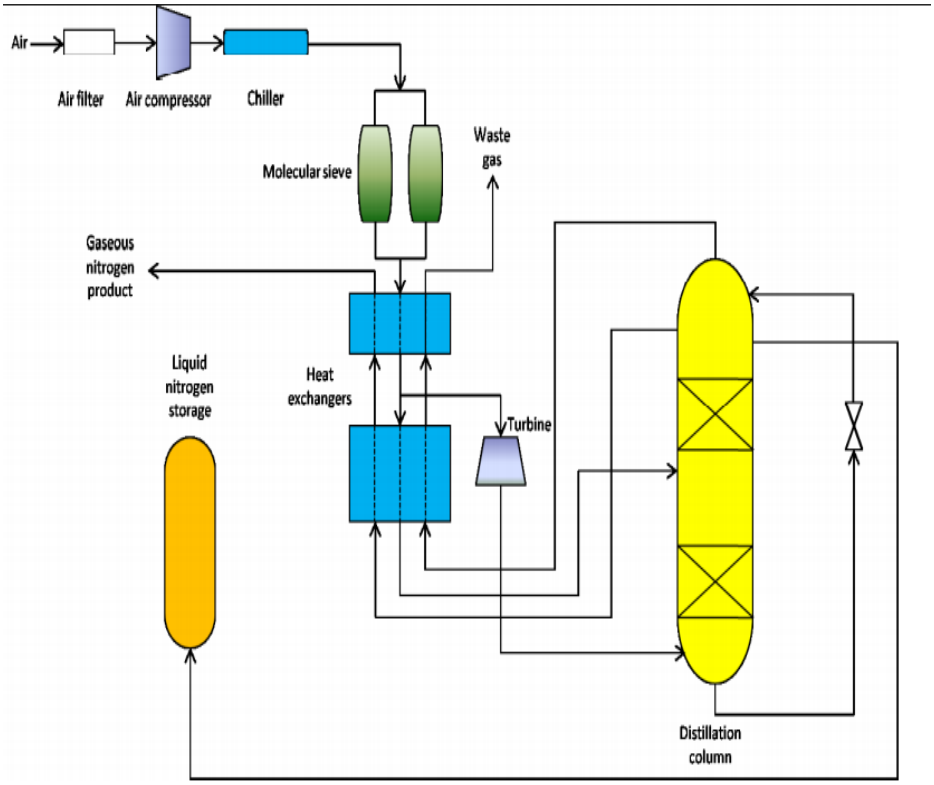
| Kapasitet ($Nm^3$/h) | Renhet (%) | Seperasjons metode |
|---|---|---|
| 1-1000 | <99,5 | Membran |
| 5-5000 | <99,99 | *Pressure swing adsorption* |
| 200-400 000 | ppb range | Kryogenisk Luft Seperasjon |

### 5.1.1 KRYOGENISK LUFT SEPERASJON

Kryogenisk luft seperasjon egner seg til større prosesser. Når det trengs større mengder, egner kryogenisk luft seperasjon seg med tanke på kapasitet muligheter. Leser av Tabell 5 så har kryogenisk potensialet til å dekke ett behov fra 200-400 000 $Nm^3$/h for produksjon.

Kryogenisk luft seperasjon illustrert i Figur 20, bruker hovedsakelig kokepunkt til atomene i luft til å hente ut nitrogenet. Prosessen krever et veldig komplekst system som involverer mange komponenter og væske strømninger. Luft består hovedsakelig av nitrogen, oksygen og argon som har kokepunktene 77,4 K, 90,2 K og 87,3 K.

Metoden er delt inn i en varm og en kald seksjon. Den varme seksjonen består av kompresjon, tørking og rensing. Kalde seksjonen består av varme veksler og destillasjonskolonner. Figur 20 illustrasjon av kryogenisk luft seperasjon med punkt beskrivelse av prosess.




FIGUR 20 KRYOGENISK LUFT SEPERASJON SYSTEM (MORGAN, 2013)

- Luft komprimeres og avkjøles for å fjerne vanndamp.
- Strømmen av den tørre luften renses for å fjerne forurensinger, som karbondioksid og potensielt gjenværende vanndamp.
- Luften blir videre avkjølt ved hjelp av avfallsproduktet oksygen og renset nitrogen fra destillasjonskolonne.
- Luften blir ytterligere avkjølt til rundt 97 K (duggpunktet for luft).
- Luften destilleres i komponentene ved hjelp av en enkelt destillasjonskolonne.

## 5.2 NITROGEN BEREGNINGER

Nødvendig mengde nitrogen finnes ved hensyn av mol produsert $H_2$ og kjemisk ligning $3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$.

Nitrogen med molar masse på 28,014 g/mol→0,028014 kg/mol, tetthet ved normalbetingelser på 1,250 kg/m$^3$ og nødvendig energimengde ved kryogenisk luftseperasjon 0,38 kWh/m$^3$ (Xiao-bin ZHANG, 2014).

**Utsira Nord:**

Nødvendig mol nitrogen for UN, med hensyn på kjemisk ligning og mengde mol hydrogen produsert. Vil da trenge:

$$\frac{3{,}510351035 * 10^{10}\ \text{mol}}{3} = 1{,}170117012 * 10^{10}\ \text{mol N}_2$$

$$m = n * M = 1{,}170117012 * 10^{10}\text{mol} * \frac{0{,}028014\text{kg}}{\text{mol}} = 327\ 796\ 579{,}7\ \text{kg N}_2$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{327\ 796\ 579{,}7\ kg\ N_2}{1{,}250\,\frac{kg}{m^3}} = 262\ 237\ 263{,}7\ m^3$$

$$262\ 237\ 263{,}7\ \text{m}^3 * 0{,}38\,\frac{\text{kwh}}{\text{m}^3} = 99\ 650\ 160{,}22\ \ \text{kwh} = 0{,}09965\ \text{TWh} \approx 0{,}1\ \text{TWh}$$

**Sørlige Nordsjø II:**

Nødvendig mol nitrogen for SNII, med hensyn på kjemisk ligning og mengde mol hydrogen produsert. Vil da trenge:

$$\frac{7{,}02070207 * 10^{10}\ \text{mol}}{3} = 2{,}340234023 * 10^{10}\ \text{mol N}_2$$

$$m = n * M = 2{,}340234023 * 10^{10}\text{mol} * \frac{0{,}028014\text{kg}}{\text{mol}} = 655\ 593\ 159{,}2\ \text{kg N}_2$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{655\ 593\ 159{,}2\ kg\ N_2}{1{,}250\,\frac{kg}{m^3}} = 524\ 474\ 527{,}4\ m^3$$

$$524\ 474\ 527{,}4\ \text{m}^3 * 0{,}38\,\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 199\ 300\ 320{,}4\ \ \text{kWh} = 0{,}1993003204\ \text{TWh} \approx 0{,}2\ TWh$$

TABELL 6 NITROGEN PRODUKSJON OVERSIKT

| **Produksjon oversikt** | **Utsira Nord** | **Sørlige Nordsjø II** |
|---|---|---|
| Nitrogen produsert (tonn) | 327 797 | 655 593 |
| Energi tilgjengelig (TWh) | 2.6 | 5,2 |
| Energi brukt (TWh) | ≈ 0,1 | ≈ 0,2 |
| Energi igjen (TWh) | 2,5 | 5 |

Fra Tabell 5 så har kryogen utbedring kapasitet på 200-400 000 $Nm^3/h$. Nitrogen med tetthet på 1,2506 $kg/m^3$, UN trenger 327 796 579,7 kg $N_2$ og SNII 655 593 159,2 kg $N_2$.

Kontrollere metodens kapasitet. Kapasitet ≥ $Nm^3/h$ for UN og SNII.

UN:

$$\frac{327\ 796\ 579{,}7\ \mathrm{kg\ N_2}}{1{,}250\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}} = 262\ 237\ 263{,}8\ m^3\ \text{årlig}$$

$$\frac{262\ 237\ 263{,}8\ m^3\ \text{årlig}}{(24\ h * 365\ d)} = 29\ 935{,}7607\ \frac{m^3}{h}$$

SNII:

$$\frac{655\ 593\ 159{,}2\ kg\ N_2}{1{,}250\,\frac{kg}{m^3}} = 524\ 474\ 527{,}4\ m^3\ \text{årlig}$$

$$\frac{524\ 474\ 527{,}4\ m^3\ \text{årlig}}{(24\ h * 365\ d)} = 59\ 871{,}52139\ \frac{m^3}{h}$$

29 936 $m^3/h$ < 59 872 $m^3/h$ < Kapasitet for kryogenisk 200-400 000 $Nm^3/h$

# 6: AMMONIAKK PROSESS

Ammoniakk prosess også ofte nevnt som Haber-Boch prosessen. Haber-Boch er en prosess innen kjemi som blir brukt til industriell fremstilling av ammoniakk. Nitrogen og hydrogen blir ført sammen under høyt trykk. Denne prosessen ble oppdaget og oppkalt etter de to tyske kjemikerne Fritz Haber og Carl Boch. Utvinning av hydrogen atomet kommer ofte fra fossilt brensel som kan anses som den klassiske ammoniakk produksjon.

Haber-Boch prosessen har endret seg minimalt, oftest metode og teknologi for uthenting av hydrogen og nitrogen som endres. Selv om den kjemiske reaksjonen er henholdsvis enkel, sitter utfordringen i utvinning av rent nitrogen og hydrogen.

## 6.1 BRUKSOMRÅDER

Ammoniakk ($NH_3$) er først og fremst veldig viktig for kunstgjødsel på verdensbasis og blir produsert på en industriell skala gjennom Haber-Boch prosess. Gjennom 2014 ble det produsert 140 millioner tonn $NH_3$ og behovet har bare fortsatt å vokse. Ammoniakken er svært viktig for bidraget til matproduksjonen.

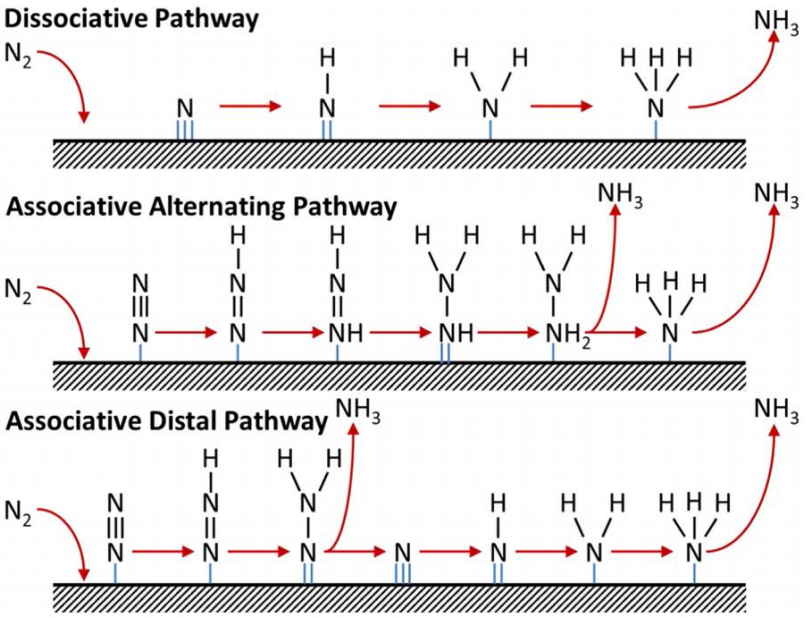
## 6.2 AMMONIAKK FREMSTILLING

Ammoniakk fremstilles med tilsetting av to strømmer: $N_2$ og $H_2$ med høy temperatur (300-500 °C) og under høyt trykk (200-300 bar) med jern eller ruthenium baserte katalysatorer.

Ved ammoniakk fremstilling her antar det at nitrogen vil bli tilført gjennom kryogenisk destillasjon og hydrogen gjennom elektrolyse (alkalisk metode). I følge (Collin Smith, 2019) krever Haber-Boch prosessen 21,3 GJ/t$NH_3$ når hydrogenet kommer fra elektrolyse, drevet av fornybare kilder.

Kjemisk ligning for ammoniakk → $3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$

Nitrogen reduksjonen til ammoniakk på en heterogen overflate kan skje med to forskjellige mekanismer *Associative og Dissociative.* Figur 21 viser nitrogenreduksjon til ammoniakk på heterogene katalysatorer (Michael A. Shipman, 2016).



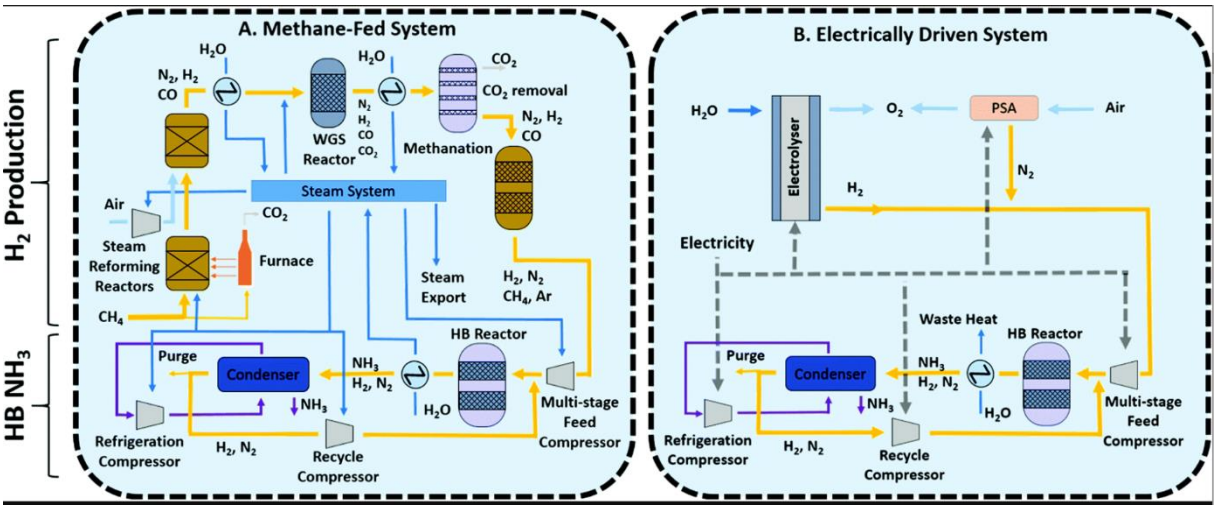

FIGUR 21 NITROGENREDUKSJON TIL AMMONIAKK (MICHAEL A. SHIPMAN, 2016)

Figur 21 illustrerer 2 forskjellige metoder *Dissociative og Associative* for nitrogenreduksjon til ammoniakk med åpent hydrogen tilførsel.

Med *associative* mekanisme forblir nitrogenatomene ($N_2$) bundet til hverandre, til det skjer en kjemisk reaksjon (hydrogenering). $NH_3$ blir først dannet da $N_2$ bryter til ett singulært N molekyl. Hydrogenering er en *assoiacitve* mekanisme og kan skje på to måter illustrert i Figur 21.

Hydrogenering skjer fortrinnsvis på nitrogenmolekylet lengst vekke fra kontaktflaten hvor det blir avgitt en enhet $NH_3$ (ammoniakk) som etterlater metall nitrido (enkelt nitrogen molekyl). Dette molekylet forsetter til det gir en ny enhet med $NH_3$. Dette er kjent som dissosiasjon *associative* metoden. Den andre metoden vist i Figur 21 nevnt som den alternative metoden hvor nitrogen bindingen($N_2$) går gjennom en hydrogenering helt til båndet bryter og avgir to enheter $NH_3$.

Med *Dissociative* mekanisme skjer bruddet med nitrogenet før noe hydrogenering forekommer. Det ligger da bare ett nitrogen adatom på overflaten som forbli slikt til det bindes med hydrogenet og blir til ammoniakk. Det er denne metoden som er antatt skjer gjennom haber boch prosessen i følge (Michael A. Shipman, 2016).




FIGUR 22 ILLUSTRERT HB PROSESS, METAN OG ELEKTROLYSE FOR $H_2$ (COLLIN SMITH, 2019)

Figur 22 viser prosesserte forskjeller når det brukes A metan gass i forhold til B elektrisk drevet for $H_2$ tilførsel. Linjer: Gul prosess gass, mørkeblå vann/damp, lyseblå luft, lilla ammoniakk, stiplet elektrisitet.

## 6.3 BEREGNINGER

Det tas utgangspunkt som beregnet i kapittel 3.3 med NVE sine estimater for områdene Utsira Nord og Sørlige Nordsjø II, videre blir det sett på potensialet av $NH_3$ produksjon for områdene.

Fra kapittel 4: og kapittel 5: finnes mengdene mol dannet $H_2$ og $N_2$. Antall mol ammoniakk blir et 3:2 forhold mellom $H_2$ og $NH_3$.

$NH_3$ gass med molar masse på 17,031 g/mol og energikrav på 21,3 GJ/t$NH_3$ (Collin Smith, 2019).

### 6.3.1 Utsira Nord:

Mol ammoniakk finnes ved å ta utgangspunkt i mol hydrogen produsert. Kommer frem til mulig masse ammoniakk fra beregnede mengder tilgjengelig av nitrogen og hydrogen.

$$3{,}510351035 * 10^{10}\ \text{mol} * \frac{2}{3} = 2{,}340234023 * 10^{10}\ \text{mol NH}_3$$

$$2{,}340234023 * 10^{10}\text{mol NH}_3 * 0{,}017031 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 398\ 565\ 256{,}5\ \text{kg} = 398\ 565{,}2565\ \text{tNH}_3$$

**Energi som kreves på 21,3 GJ/tNH3:**

Gitt energikrav for Haber-Boch prosess med hydrogen og nitrogen tilførsel vil dette bli kravene:

$$398\ 565{,}2565\ \text{tNH}_3 * 21.3 \frac{\text{GJ}}{\text{tNH}_3} = 8\ 489\ 439{,}963\ \text{GJ}$$

$$8\ 489\ 439{,}964\ \text{GJ} = 2{,}358177\ \text{TWh}\ \approx 2{,}4\ \text{TWh}$$

### 6.3.2 Sørlige Nordsjø II:

Mol ammoniakk finnes ved å ta utgangspunkt i mol hydrogen produsert. Kommer frem til mulig masse ammoniakk fra beregnede mengder tilgjengelig av nitrogen og hydrogen.

$$7{,}02070207 * 10^{10}\ \text{mol} * \frac{2}{3} = 4{,}680468047 * 10^{10}\text{mol NH}_3$$

$$4{,}680468047 * 10^{10}\text{mol NH}_3 * 0{,}017031 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 797\ 130\ 513{,}1\ \text{kg} = 797\ 130\text{tNH}_3$$

**Energi Krav på 21.3GJ/tNH3:**

Gitt energikrav for Haber-Boch prosess med hydrogen og nitrogen tilførsel vil dette bli kravene:

$$797\ 130{,}5131\ \text{tNH}_3 * 21{,}3 \frac{\text{GJ}}{\text{tNH}_3} = 16\ 978\ 879{,}93\ \text{GJ}$$

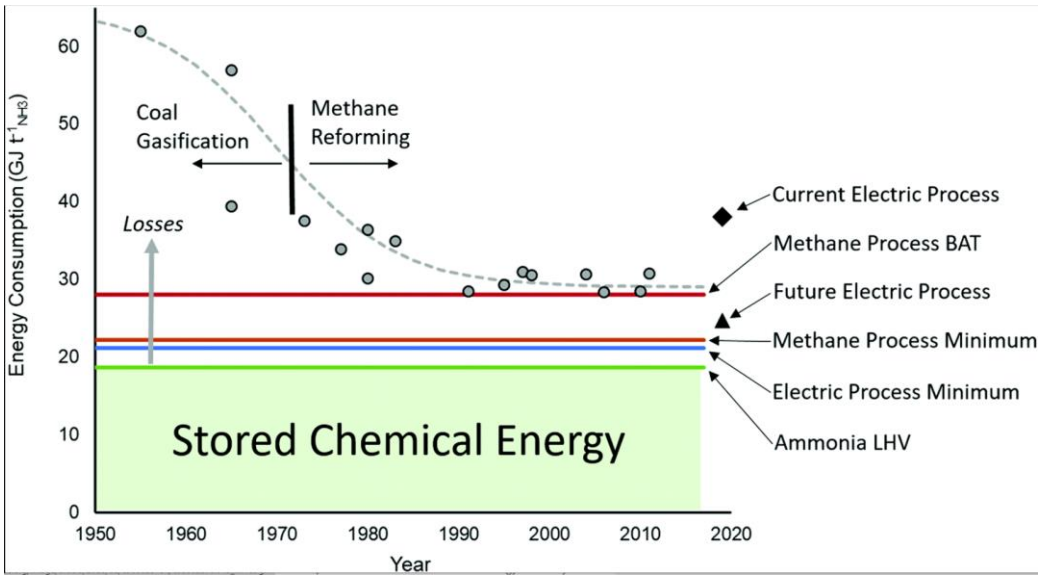
$$16\ 978\ 879{,}93\ \text{GJ} = 4{,}716355536\ \text{TWh}$$

TABELL 7 AMMONIAKK PRODUKSJON OVERSIKT

| Produksjon oversikt | Utsira Nord | Sørlige Nordsjø II |
|---|---|---|
| Ammoniakk produsert (tonn) | 398 565 | 797 130 |
| Energi tilgjengelig (TWh) | 2,5 | 5 |
| Energi brukt (TWh) | ≈ 2,4 | ≈ 4,7 |
| Energi igjen (TWh) | 0,1 | 0,3 |

Fra Tabell 7 ser vi de endelige energi mengdene og slutt resultat av produsert $NH_3$. For UN så ender det på ett overskudd av 0,1 TWh og SNII 0,3 TWh. Justeringer av energi mengde brukt til hydrogen produksjon, endre teknologi og metoder er faktorer som kan endres for å påvirke til eventuelle andre resultater.

## 6.4 TAP




FIGUR 23 ENERGI KRAV FOR HB PROSESS (VÉRONIQUE DIAS, 2020)

Laveste energi krav for HB blir definert som LHV i Figur 23 som er nedre brennverdi på ammoniakk, som er på 18,6 $GJ/tNH_3$. Alt over vil tilsvare tap (Véronique Dias, 2020).

Tap differanse: $(21{,}3 - 18{,}6)$ GJ/t$NH_3$ = 2,7 GJ/t$NH_3$

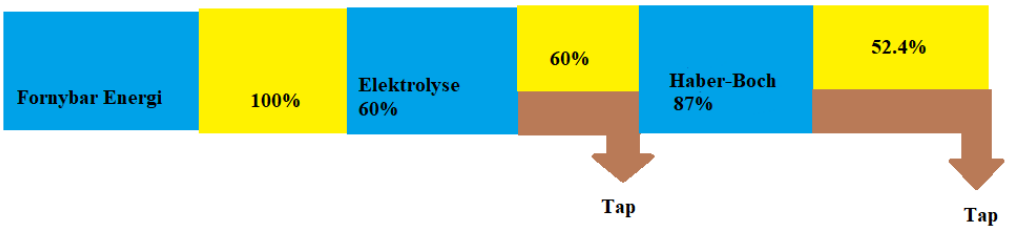
Utsira Nord: $2{,}7 \frac{\text{GJ}}{\text{tNH}_3} * 398\ 565\ \text{t}NH_3 = 1\ 076\ 125{,}5\ \text{GJ} \approx 0{,}3\ \text{TWh}$

Sørlige Nordsjø II: $2{,}7 \frac{\text{GJ}}{\text{tNH}_3} * 797\ 130\ \text{t}NH_3 = 2\ 152\ 251\ \text{GJ} \approx 0{,}6\ \text{TWh}$

Tabell 7 viser energi brukt for begge områdene for dannelse av ammoniakk. Utsira Nord på 2,4 TWh og Sørlige Nordsjø II på 4,7 som vil tilsvarer energieffektivitet for Haber-Boch på differansen i energi krav og tapet.

Utsira Nord: $\frac{(2{,}4-0{,}3)\text{TWh}*100\%}{2{,}4} = 87{,}5\ \%$

Sørlige Nordsjø II: $\frac{(4{,}71-0{,}6)\text{TWh}*100\%}{4{,}71} = 87{,}3\ \%$

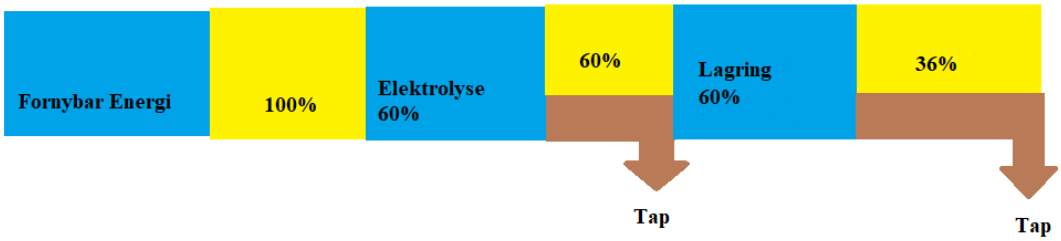



FIGUR 24 ENERGIEFFEKTIVITET FORNYBAR ENERGI TIL AMMONIAKK LAGRET

Energieffektivitet over prosess 60%(elektrolyse), 87% over Haber-Boch og 99% for å lagre ammoniakken (Véronique Dias, 2020).

For Utsira Nord og Sørlige Nordsjø II er Figur 24 laget for å illustrere energieffektivitet fra elektrisitet kommer fra vindkraftparken til lagring av ammoniakken. Det vil forekomme ytterlige tap gjennom en eventuell transport av brenselet. Total energieffektivitet på 52%.

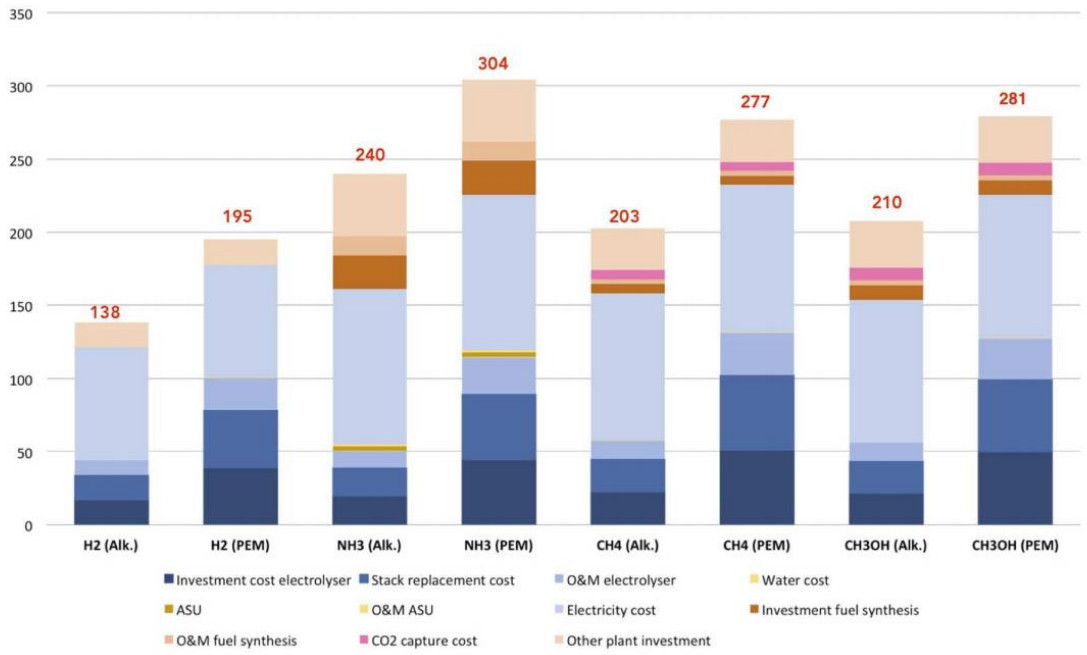
Ved bruk av samme elektrolysemetode som i Figur 24, kombinert med hydrogen energikrav på 40% for omdanning til væske (Morgan, 2013). Blir den totale energieffektiviteten for hydrogen på 36%, illustrert i **Feil! Fant ikke referansekilden.**. Lagring av hydrogen i væskeform krever lave temperatur (-252 °C) og gasstrykket ligger omkring atmosfæretrykk.




FIGUR 25 ENERGIEFFEKTIVITET FORNYBAR ENERGI TIL HYDROGEN LAGRET (MORGAN, 2013)

## 6.5 PRODUKSJONS KOSTNADER HYDROGEN OG AMMONIAKK

Figur 26 viser produksjons kostnader for forskjellige typer brensel. $NH_3$ med alkalisk metode ligger på 240 €/$MWh_{brensel}$, dette er ikke inkludert lagring og transport av brenselet. $H_2$ ligger på 138 €/$MWh_{brensel}$ med alkalisk metode.




**FIGUR 26 PRODUKSJONS KOSTANDER OVERSIKT (VÉRONIQUE DIAS, 2020)**

Ammoniakk produsert fra UN og SNII, med en priser estimert fra Figur 26 vil tilsvare en produksjons kostnad på 240 øre/$kWh_{Ammoniakk}$ og 138 øre/$kWh_{Hydrogen}$. Med forbehold om: 1€ = 10kr, energiinnhold for hydrogen 33kWh/kg $H_2$ og ammoniakk med 5,2 kWh/kg $NH_3$ (Véronique Dias, 2020).

Hydrogen vil få en ekstra kostnad hentet fra Figur 28 på 1,88 €/kg $H_2$ for omdannelse til væskeform før lagring, som utgjør ekstra $\frac{1{,}88\frac{€}{\text{kg H}_2}}{33\frac{\text{kWh}}{\text{kg H}_2}} * 1000 = 56{,}97\frac{\text{øre}}{\text{kWh}}$ hydrogen produksjon vil da ende på 195 øre/kWh.

# 7: AMMONIAKK LAGRING/TRANSPORT

Når ammoniakken har blitt prosessert offshore må det være noe tilrettelagt for videre transport eller lagring i gass, væske eller fast form. Væskeform kan oppnås med atmosfærisk trykk og -33°C eller ved omgivelsestemperatur og trykk på 8 bar. Lagring av flytende ammoniakk er ikke generelt dyrt i forhold til eksempelvis hydrogen grunnet dens egenskaper og energikravet er på 0.1% for omdannelse fra gass til væske (Véronique Dias, 2020).

Ammoniakk nettverk for transport er ikke så utbredt i Europa i forhold til andre kontinenter som Amerika. (Véronique Dias, 2020). Det finnes allerede teknologier for transport av naturgass (LNG) i Norge som kan brukes til ammoniakken. Ammoniakk har egenskaper som gjør det lettere å håndtere enn naturgass og hydrogen.

Fra Figur 27 viser de kjemiske egenskapene til hydrogen, metan, metanol og ammoniakk. Ammoniakken $NH_3$ består av store mengder hydrogen og kan også bli brukt som hydrogen bærer. Da vil hydrogenet bli hentet ut igjen når det er ønskelig.

| | $H_2$ | $CH_4$ | $CH_3OH$ | $NH_3$ |
|---|---|---|---|---|
| Boiling point | −252.7°C | −161.5°C | 65°C | −33.34°C |
| Melting point | −259°C | −182°C | −98°C | −77.73°C |
| Gas density | 0.089 kg/m$^3$ | 0.707 kg/m$^3$ | 0.24 kg/m$^3$ | 0.769 kg/m$^3$ |
| Liquid density | 0.071 kg/L | 0.465 kg/L | 0.791 kg/L | 0.6819 kg/L |
| Lower HV | 119.9 MJ/kg | 50 MJ/kg | 20.1 MJ/kg | 18.6 MJ/kg |
| | 8.5 MJ/L as liquid | 20.9 MJ/L as liquid | 15.8 MJ/L | 12.7 MJ/L |
| Higher HV | 141.9 MJ/kg | 56.2 MJ/kg | 22.9 MJ/kg | 22.5 MJ/kg |
| | 10.1 MJ/L as liquid | 23.6 MJ/L as liquid | 18.2 MJ/L | 15.3 MJ/L as liquid |
| Auto ignition | 585°C | 632°C | 464°C | 651°C |
| Flammability/air | 4–75% | 5–15% | 6.7–36.5% | 15–28% |

**FIGUR 27 KJEMISKE EGENSKAPER AMMONIAKK (VÉRONIQUE DIAS, 2020)**

Alternative transportløsninger, finnes forskjellige interessante muligheter for ett offshore produksjons område:

- Transport med båt til land.

  Det foreligger allerede velkjent teknologi for transport av naturgass (LNG), den samme teknologien kan bli brukt til ammoniakk i væskeform. Muligheter offshore for å bringe ammoniakken tilbake til land. Ammoniakken er lettere å transportere og håndtere enn naturgass og hydrogen med tanke på egenskaper til de forskjellige brenslene.

- Gassrør som ikke blir brukt pr dags dato.

Muligheten for å bruke eksisterende gassrør til transport av ammoniakken, relativt nytt for ammoniakk. Vil være en størst fordel for hydrogen da det kan sendes før omdannelse til væskeform og unngå en del tap samt kostnader. Det trengs ikke nødvendig nye rør, men muligheter rundt eksiterende LNG systemer. Det kan strekkes ut koblings muligheter fra prosess område offshore.

- Tanking stasjon.

Lagring av ammoniakken i gass eller væskeform offshore. Kan brukes som påfyllingsstasjon av brensel til skip, båter osv. Ut ifra rapport kan hydrogen virke dyrt samt energikrevende til å lagre i flytende form. Med slike muligheter fremstår det mer aktuelt for ammoniakk.

**FIGUR 28 TEORETISK FREMSTILLING, ELEKTROLYSEPLATTFORM (VISETH, TU.NO/ARTIKLER, 2020)**

Figur 28 viser en illustrasjon om hvordan plattformer kan være plassert i nærheten av vindparkene. Hvor det kan være potensialet for båter med påfyllingsstasjoner. Påfylling fra stasjon kan være for videretransport, men også for å tas i bruk som drivstoff av fartøy.

## 7.1 LAGRINGS KOSTNAD AMMONIAKK OG HYDROGEN

Figur 29 estimerte kostander for transport og lagring av ammoniakk og hydrogen. Det blir ikke nevnt hvor lenge brenselet lagres, eller volum det er snakk om. Med transport så er kostnaden estimert med rør og en distanse på 250 km (Véronique Dias, 2020).

| | $H_2$ | $NH_3$ | $CH_4$ | $CH_3OH$ |
|---|---|---|---|---|
| **Conversion (€/kg$_{H2}$)[a]** | | | | |
| Gas to Gas | 0.35 | | | |
| (15–250 bar) | | | | |
| Gas to Liquid | 1.88 | | | |
| **Storage cost** | | | | |
| $CO_2$ cost (€/ton$_{CO2}$)[b] | | | 8 | 8 |
| Fuel cost (€/kg$_{Fuel}$) | 10.01 (gas)[a] | 0.08[c] | 0.69[d] | 0.01[e] |
| | 0.98 (liq)[a] | | | |
| **Transportation cost** | | | | |
| $CO_2$ cost (€/ton$_{CO2}$)[b] | | | 4 | 4 |
| Fuel cost (€/kg$_{Fuel}$) | | | | |
| Pipe | 1.43[a] | 0.03[c] | 0.1[f] | |
| Truck | 2.14 (gas)[a] | | 0.18[f] | 0.02[f] |
| | 0.5 (liq)[a] | | | |

FIGUR 29 LAGRING OG TRANSPORT KOSTNAD AMMONIAKK (VÉRONIQUE DIAS, 2020)

Fra Figur 29 ammoniakk kostnad for lagring på 0,08 €/kg$_{Brensel}$ og transport via rør 0,03 €/kg$_{Brensel}$. Med ett energiinnhold på 5,2 KWh/kg og 1 € =10 nok.

For Hydrogen pris for lagring 0,98 €/kg$_{Bresnel}$ i væskeform og transport via rør 1,43 €/kg$_{Brensel}$. Med ett energiinnhold på 33 KWh/kg og 1 € = 10 nok.

Blir kostnad som følgende Tabell 8 omgjort til øre/kWh.

TABELL 8 KOSTNADS OVERSIKT AMMONIAKK OG HYDROGEN. LAGRING OG TRANSPORT

| | Ammoniakk | Hydrogen |
|---|---|---|
| Lagring (øre/kWh) | 15,4 | 29,7 |
| Transport via rør (øre/kWh) | 5,8 | 43,3 |

# 8: OVERSIKT RESULTATER

Tabell 9 oversikt over energieffektiviteten av elektrisitet og elektrisiteten fra vindkraftparkene til de lagrede brenslene. Beregninger med data fra områdene UN og SNII. Tabell 10 estimerte tap over 1års produksjon for områdene UN og SNII ut fra beregnet energieffektivitets prosent Tabell 9. Elektrisitet med relativt lite tap 1-2%, ammoniakk med energi tap på 48% og hydrogen med 68%. Hydrogen ligger ganske likt med ammoniakk frem til gassen må gjøres om til væske for videre lagring og transport.

TABELL 9 ENERGIEFFEKTIVITET FOR UN OG SNII. ELEKTRISK, AMMONIAKK, HYDROGEN

| Energieffektivitet (%) | Utsira Nord | Sørlige Nordsjø II |
|---|---|---|
| Elektrisitet | 98,86 | 98,09 |
| Ammoniakk | 52 | 52 |
| Hydrogen | 36 | 36 |

TABELL 10 TOTALE TAP FOR UN OG SNII

| | Utsira Nord | Sørlige Nordsjø II |
|---|---|---|
| Produksjons Kapasitet (GWh) | 6500 | 13 000 |
| **Tap** | | |
| Elektrisk (GWh) | 74,1 | 248,3 |
| Ammoniakk (GWh) | 3120 | 6240 |
| Hydrogen (GWh) | 4420 | 8840 |

Tabell 11 Ammoniakk produksjon forhold til hydrogen, 45 øre/kWh dyrere å produsere, billigere å lagre samt transportere som utgjør en rimeligere total kostnad. Forholdet til elektrisitet 146,2 øre/kWh dyrere totalt. Tabell 12 oversikt over verdi. Strømpris gitt av SSB snitt over 2020 (SSB, 2021). NVE verdsetter hydrogen til 90 KR/kg $H_2$ og fra Figur 27 leses av en energitetthet på 119,9 MJ/kg $H_2$ resulterer i en estimert verdi på 272 øre/KWh. Ammoniakk verdi blir estimert ut med tall fra (Sharpe, 2020) som estimerer en verdi fra $190-198/t$NH_3$, med gitt energitetthet på 18,6 MJ/kg fra Figur 27 og 1$ = 8,32nok. Tilsvarer dette i en verdi på 320 øre/KWh.

TABELL 11 KOSTNADS OVERSIKT PRODUKSJON, LAGRING, TRANSPORT

| Kostnad (Øre/kWh) | Ammoniakk | Hydrogen | Elektrisitet |
|---|---|---|---|
| Produksjon | 240 | 195 | |
| Lagring | 15,4 | 29,7 | |
| Transport | 5,8 | 43,3 | |
| **Totalt** | **261,2** | **268** | **91 (SNII)** |

TABELL 12 ESTIMERT VERDI ELEKTRISITET, AMMONIAKK OG HYDROGEN

| Energi | Øre/kWh |
|---|---|
| Strøm/Elektrisitet | 80,3 |
| Ammoniakk | 320 |
| Hydrogen | 272 |

# 9: DISKUSJON OG FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

## 9.1 DISKUSJON

Teknologien for offshorevind befinner seg i en begynnerfase fortsatt i Norge, det er mer brukt og utviklet nedover i Europa. Flere bedrifter ser ut som å henge seg på fornybare metoder for energiutvinning, blant annet Equinor som har planer om å dekke energibehovet til flere plattformer med offshore vindkraft, noe som antyder en økning av interesse i Norge Figur 9.

Elektrisitetstap via kabel ble litt mer omfattende og tidskrevende enn planlagt, så direkte sammenligning med ammoniakk ble ikke realisert på samme måte som håpet. Det ble brukt tap kalkulert fra en mindre vindkraftpark og en energikostnad estimert ut fra område Sørlige Nordsjø II. Energikostnad for Utsira Nord var utelukket fra områdene som ble estimert fra kilde, grunnet usikkerhetsfaktorene rundt nødvendig flytende fundamenter.

Energieffektivitet er beregnet ut fra antatt kapasitet til UN og SNII med en kapasitetsfaktor på 50% samt satt av 60% av områdenes kapasitet til hydrogen produksjon. Sluttresultater viser ett overskudd for UN på 0,1 TWh og SNII på 0,3 TWh. Mulig det er nødvendig med overskudd til annet bruk eller eventuelt prøve å nå nærmest mulig 0 til rest.

Kostnader blir naturlig å sammenligne opp mot verdi, begge definert i **øre/kWh**. Kostnader for ammoniakk 261,2, hydrogen 268 og elektrisitet på 91. Verdien for ammoniakk har blitt estimert til 320, hydrogen pris i Norge 272 og elektrisitet har en salgs pris på 80,3 ut til forbruker i snitt gjennom 2020. Størst verdi blir da ammoniakk, etterfulgt av hydrogen. For elektrisitet vil det være tap med verdi på 80,3 kontra kostnader på 91. Det betyr med disse estimater for standard strøm via kabler til land, vil ikke være hensiktsmessig med nåtiden teknologi å bygge vindkraftpark med fortjeneste.

Ammoniakk kommer ut med høyest fortjeneste da kostnad estimeres til 261,2 og verdi på 320. Verdien er anslått med usikre tall, da informasjon om dette vanligvis blir betalt for er det blitt gjort en vag estimering for å få en sammenligning. Det kan også antas at priser for ammoniakk og hydrogen ville gått ned hvis flere store prosjekter som i oppgaven hadde blitt realisert.

Ved fremtidige muligheter er det antatt for elektrolyse metoden (PEM) kan nå opp til 75% energieffektivitet Figur 19, som vil være et sprang på 15% fra alkalisk metode. Ville blitt betydelig innvirkning på store produksjons områder som UN og SNII.

Ved lagring og transport med båt fremstår ammoniakk i væske fornuftig. Ammoniakk er giftig brensel som krever god oppfølging og systemer for å kontrollere dette. Hydrogen virker som en god løsning hvis det kan holdes i gassform og sendes direkte etter elektrolysen, via rør på havbunn.

## 9.2 FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

Det er mye videre arbeid som kan og bør gjøres før slike anlegg bør bygges istedenfor å sende elektrisitet direkte til land. UN og SNII blir kanskje litt for store prosjekter til å begynne med. Mindre prosjekter eller prototyper for videre samling av data kan hjelpe.

- Innhente mer informasjon av ammoniakk anlegg med fornybar energi som kilde til nødvendig energi.
- Fastsette mer detaljerte data fra elektrisitet tap.
- Se på metoder, prosessanlegg og verktøy spesifikt siktet for offshore produksjon.
- Høyere energieffektivitet over komponenter.
- Fremtidig elektrolyse med større virkningsgrad.
- Vedlikeholds krav til forskjellige systemer. Offshore ønsket mest selvdrevent og uavhengig system.
- Sammenligne nærmere produksjon av hydrogen gass kontra ammoniakk i væskeform.

# 10: KONKLUSJON

Ifølge beregningene og estimater gjort vil elektrisitet direkte til land ha klart minst tap etterfølgt av ammoniakk og hydrogen med størst tap. Verdiene som ligger i ammoniakk og hydrogen blir potensialet med lagring av energien samt transport muligheter.

Med områdene Utsira Nord 1500 MW og Sørlige Nordsjø II 3000 MW som utgangspunkt for produksjon ble det laget figurer til illustrasjon av energieffektivitet over de største leddene fra elektrisitet til lagring av væskeform. Med estimerte tap for elektrisitet 1-2%, hydrogen 64% og ammoniakk 48%.

Energi krav for å danne ammoniakk på 21,3 GJ/t $NH_3$ er relativt lav da den teoretisk ikke kan gå lavere enn forbrennings varmen til ammoniakk på18,6 GJ/t $NH_3$. Det største tapet, 40% forekommer gjennom elektrolysen for nødvendig hydrogen produksjon ved alkalisk metode.

Ammoniakk fremstår som ett godt alternativ i forhold til hydrogenproduksjon ved lagring i væskeform. Ammoniakk produksjon krever en ekstra prosess Haber-Boch, men det forekommer så store tap ved lagring av hydrogen at det fremstår fornuftig ut fra resultater. Alternativet for å unngå for store tap med hydrogen, blir å transportere direkte etter elektrolysen når hydrogenet fortsatt befinner seg i gassfase.

$CO_2$ utslippet viser seg å gå ned med 75% når strømmen kommer av fornybare kilder til hydrogen produksjon. Hvor utslippene kommer fra produksjon, transport og installasjon. Med elektrolyse ligger dette på 0,38 $tCO_2/tNH_3$.

Kostnader blir naturlig å sammenligne opp mot verdi, begge definert i øre/kWh. Kostnader for ammoniakk 261,2, hydrogen 268 og elektrisitet på 91. Verdien for ammoniakk har blitt estimert til 320, hydrogen pris i Norge 272 og elektrisitet har en salgs pris på 80,3 til forbruker i snitt gjennom 2020. Størst verdi blir da ammoniakk, etterfulgt av hydrogen. Elektrisitet vil det være tap med verdi på 80,3 kontra kostnader på 91.

Ammoniakk produksjon offshore fremstår som en fremtidig bærekraftig løsning til vindparker, spesielt hvis det er ønskelig å lagre energien offshore. Potensialet kan bli stort med videre utvikling av elektrolyse samt andre ledd i prosessen. Hydrogen produksjon kan være effektivt når det er tilrettelagt direkte transport til land etter gass dannelse. Ved å sende strøm direkte til land unngås store tap, spesielt rundt så store anlegg som er tatt i betraktning gjennom oppgaven.

# 11: REFERANSELISTE

Benjaminsen, C. (2019, juli 26). *forskning*. Hentet fra Forskning.no: https://forskning.no/energi-fornybar-energi-klima/dette-ma-du-vite-om-hydrogen/1359513

Benjaminsen, C. (2019, juli 26). *Forskning.no*. Hentet fra https://forskning.no/energi-fornybar-energi-klima/dette-ma-du-vite-om-hydrogen/1359513

Bjartnes, A. (2019, Juni 20). *Energi og Klima*. Hentet fra https://energiogklima.no/blogg/mange-floker-offshore-vind-politikk/

Catapult. (2018, Mai). *Guide to an offshore windfarm*. Hentet fra https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind-farm-costs

Collin Smith, A. K.-M. (2019). *Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape.* Energy & Enviromental Science.

Equinor. (2021). *Equinor*. Hentet fra Equinor: https://www.equinor.com/no/what-we-do/floating-wind/hywind-scotland.html

Funkjoker23. (2011, Desember 10). *Wikipedia*. Hentet fra https://no.wikipedia.org/wiki/Generator#/media/Fil:DFIG_in_Wind_Turbine.svg

Irena. (2020, November 19). *International Renewable Energy Agency*. Hentet fra irena.org: https://www.irena.org/wind

Kamilla Nieradzinska, C. M. (2020). *Optioneering analysis for connecting Dogger Bank offshore wind farms to the GB electricity network.* Glasgow UK: Institute for Energy&Environment, Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde.

Lazaridis, L. P. (2005). *Economic Comparison of HVAC and HVDC Solutions for Large Offshore WInd Farms under Special Consideration of Reliability.* Stockholm: Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering.

Michael A. Shipman, M. D. (2016). *Catalysis Today.* Glasgow: WestCHEM, University of glasgow.

Midttun, Ø. (2020, august 28). *Petroleumtilsynet*. Hentet fra ptilt.no: https://www.ptil.no/fagstoff/utforsk-fagstoff/reportasjer/2020/fakta-om-havvind/

Morgan, E. R. (2013). *Techno-Economic Feasibility Study of Ammonia Plants Powered by Offshore Wind.* Massachusetts: University of Massachusetts Amberst.

Norce. (2021, Januar 15). *Norceresearch.no.* Hentet fra https://www.norceresearch.no/om-oss: https://www.norceresearch.no/om-oss

*Norskindustri.no*. (2020, 10 20). Hentet fra https://www.norskindustri.no/dette-jobber-vi-med/energi-og-klima/norsk-industri-om-vindkraft/avgjorende-med-gode-rammebetingelser-for-a-realisere-havvind-i-norge/

NVE. (2019). *NVE*. Hentet fra Nve.no: https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2019/faktaark2019_15.pdf

NVE. (2020, Desember 18). *NVE*. Hentet fra Energiforsyning: https://www.nve.no/energiforsyning/kraftproduksjon/vindkraft/havvind-i-norge/

Odd Richard Valmot. (2017, mars 11). *tu.no/artikler*. Hentet fra https://www.tu.no/artikler/hvordan-flytte-mye-strom-veldig-langt-svaret-er-i-okende-grad-likestrom/377292

Olje- og energidepartementet. (2019, Juni 18). *Regjeringen*. Hentet fra Regjeringen.no: https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/foreslar-apning-av-omrader-for-havvind/id2655113/

Parmar, V. V. (2019). *Ammonia Production From A Non-Grid Connected Floating.* Massachusetts: University of Massachusetts.

Ramadan, H. S. (2012). *Non-linear control and stabilization of VSC-HVDC transmission systems.* HAL archives-ouvertes.

Recharge. (2020, Juni 8). *Rechargenews*. Hentet fra https://www.rechargenews.com/wind/denmark-maps-seas-for-future-offshore-wind-farms-and-energy-islands/2-1-821629

Sharpe, R. (2020). Carribean Ammonia. *Argus*, 1.

SSB. (2021, Februar 15). *Statistisk Sentralbyrå*. Hentet fra https://www.ssb.no/energi-og-industri/artikler-og-publikasjoner/veldig-lav-strompris-i-2020

Statnett. (2020, November 25). *Statnett*. Hentet fra Havvind fra Utsira og Sørlige Nordsjø II : https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/nettkapasitet-til-produksjon-og-forbruk/tilknytning-av-havvind-fra-utsira-og-sorlige-norsjo-ii/

The Crown Estate, O. R. (2019). *Guide to an offshore wind farm.* BVGassociates.

Valmot, O. R. (2017, mars 11). *tu.no/artikler*. Hentet fra tu.no: https://www.tu.no/artikler/hvordan-flytte-mye-strom-veldig-langt-svaret-er-i-okende-grad-likestrom/377292

Véronique Dias, M. P. (2020). *Energy and Economic Costs of Chemical Storage.* froniters in Mechanical Engineering.

Viseth, E. S. (2020, august 6). *tu.no/artikler*. Hentet fra https://www.tu.no/artikler/vil-lage-hydrogen-eller-ammoniakk-pa-norges-nye-havvind-felt/495688

Viseth, E. S. (2020, august 6). *tu.no/artikler*. Hentet fra https://www.tu.no/artikler/vil-lage-hydrogen-eller-ammoniakk-pa-norges-nye-havvind-felt/495688

Wordpress. (2016, april 27). *Vindenergi*. Hentet fra Vindenergi wordpress: https://vindergi.wordpress.com/2016/04/27/hvordan-fungerer-en-vindturbin/

Xiao-bin ZHANG, J.-y. C.-h.-j.-m. (2014). *Research and development of large-scale cryogenic air sepperation in China.* Zhejian University- Science A (applied physics & engineering).