

Jonas Veie Daling

Undersøkelse av potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk

Bacheloroppgave i ingeniørfag, maskin
Veileder: Thomas Haavi

Mai 2022

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

Bacheloroppgave

2022



Jonas Veie Daling

Undersøkelse av potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk

Bacheloroppgave i ingeniørfag, maskin
Veileder: Thomas Haavi

Bacheloroppgave
Mai 2022

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Bacheloroppgave

Oppgavens tittel: Undersøkelse av potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk Project title: Research of the potential of hydrogen as an energy carrier and fuel in agriculture	Gitt dato: 15.12.2021
	Innleveringsdato: 20.05.2022
	Gradering <input checked="" type="checkbox"/> åpent <input type="checkbox"/> lukket <input type="checkbox"/> åpent fra _____
	Antall sider/vedlegg: 90
Studieretning: Maskiningeniør	Navn: Jonas Veie Daling e-post: jonasvd@ntnu.no tlf: +47 948 88 270
Veileder: Thomas Haavi e-post: thomas.haavi@ntnu.no tlf: +47 982 30 442	

Sammendrag

Formålet med oppgaven er å undersøke potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk. Bacheloroppgaven er basert på 3 caser med to ulike fornybare energikilder. De fornybare energikildene er vind- og solkraft. I undersøkelsen benyttes vindkraft i case 1, solkraft i case 3 og vind- og solkraft sammen i case 2. Oppgaven har som hensikt å finne lønnsomheten i casene gjennom LCOH og kostnad per kWh benyttet energi. På bakgrunn av dette er problemstillingen:

Hvilket potensial har hydrogen til å være energibærer i et energiproduserende anlegg basert på fornybar energi innen landbruk? Hvor lønnsomt er det å konvertere elektrisk energi til hydrogen, og videre bruke denne innen drivstoff eller til å produsere elektrisk energi?

Oppgaven tar utgangspunkt i data fra NVE, PVGIST, NEL, Ballard, TrønderEnergi og Sintef. I casene produseres fornybar energi som lagres i batteri som korttidslagring og fordeles til drift eller til hydrogenproduksjon gjennom våtelektrolyse. Produsert hydrogen lagres og blir fordelt til brenselcelle for å dekke strømbehovet eller til drivstoff. Kostnader for casene blir beregnet og brukes til å finne LCOH og kostnad per kWh benyttet energi.

Resultatene viser at case 1 med vindkraft som fornybar energikilde, har lavest LCOH på 6,473 €/kg og kostnad per kWh benyttet energi på 44,84 NOK/kWh. Case 2 med sol- og vindkraft som energikilde har LCOH på 10,351 €/kg og kostnad per kWh benyttet energi på 63,28 NOK/kWh. Case 3 med solkraft som energikilde har LCOH på 81,52 €/kg og kostnad per kWh benyttet energi på 56,55 NOK/kWh.

Med dagens energipriser er det ikke lønnsomt å bruke hydrogen som energibærer til strømproduksjon innen landbruket, men med lavere investeringskostnader på komponenter og støtteordninger vil det i fremtiden kunne bli lønnsomt. Med dagens hydrogendrivstoff-pris på 90 kr per kg er konklusjonen at case 1 med vindkraft som fornybar energikilde har konkurransedyktig LCOH på 6,473 €/kg [40]. Potensialet til hydrogen som energibærer utnyttes best ved storskala energiproduksjon, der varmetap i elektrolysør og brenselcelle gjenvinnes, slik at totalt effektivitetstap under konvertering av energiform holdes på et minimum.

Abstract

The aim of this research is to find the potential of hydrogen as an energy carrier and as fuel based on renewable energy. The research is based on 3 cases with different renewable energy sources. The renewable energy sources are wind and solar power, and they are used individually in two cases and are combined in one case. The purpose of the research is to find the profitability of the various cases through LCOH and cost per kWh of used energy. Based on this, the issue is:

What potential does hydrogen have to be an energy carrier in an energy-producing plant based on renewable energy for agriculture? How efficient is it to convert electrical energy into hydrogen, and how efficient is it to convert electrical energy into hydrogen, and further use it in fuel or to produce electrical energy?

The research is based on data from NVE, PVGIST, NEL, Ballard, TronderEnergi and Sintef. The cases produce renewable energy which is stored short time in battery and distributed for operation or for hydrogen production through electrolysis. The stored hydrogen is distributed to the full cell to cover power requirements or to fuel. Cost for the cases is calculated and used to find LCOH and cost per kWh of energy used.

The results show that case 1 with wind power as renewable energy source, had the lowest LCOH of 6,473 €/kg and cost per kWh used energy of 44,84 NOK/kWh. Case 2 with solar and wind power as energy source has an LCOH of 10,351 €/kg and an energy cost of 63,28 NOK/kWh. Case 3 with solar power as energy source has an LCOH of 81,52 €/kg and an energy cost of 56,55 NOK/kWh.

With current energy prices, it is not profitable to use hydrogen as an energy carrier for electricity production in agriculture, but with lower investment costs for components and support schemes, it can be profitable in the future. With the current hydrogen fuel price at 90 NOK per kg, the conclusion is that case 1 with wind power as a renewable energy source has a competitive LCOH of 6,473 €/kg [40]. The potential of hydrogen as an energy carrier is best utilized in large scale energy production, where heat loss in the electrolyser and fuel cell is recovered, so that efficiency losses during energy conversion are kept to a minimum.

Forord

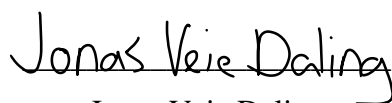
Bacheloroppgaven er det avsluttende arbeidet i en bachelorgrad ved maskiningeniørstudiet, retning industriell design, ved Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet (NTNU). Oppgaven er skrevet av Jonas Veie Daling.

Opgaven ble forespurt til NTNU ved ønske om å undersøke potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff fra fornybare energikilder innen landbruk. Det innledende arbeidet med bacheloroppgaven startet januar 2022 med forprosjektrapport, som fastsatte problemstilling, tema og fremgangsmåte til det videre arbeid mot sluttrapporten.

Hensikten med oppgaven er å belyse potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk, og videreføre kunnskap til leser og rapportskriver. Oppgaven vil presentere fremtidsrettede anlegg, som kan være aktuelle med tanke på bærekraft og klimamål. Teknologien som benyttes i slike anlegg er under utvikling, og kan ha et stort potensial i fremtiden.

Arbeidet med oppgaven har vært svært lærerikt, og resultert i god kompetanse innen en fremtidsrettet teknologi. Vil takke veileder Thomas Haavi fra NTNU som har besvart spørsmål underveis og hjulpet til med litteratur og programvare. Jeg vil også takke TrønderEnergi med Bernhard Kvaal og Håvard Dahl Mediaas for anleggsbesøk og for å ha bidratt med nyttig informasjon.

Trondheim, 18. mai 2022


Jonas Veie Daling

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	i
Forord	iii
1 Innledning	1
2 Teori	2
2.1 Geografisk plassering.....	2
2.2 Solceller	3
2.2.1 Bærekraft og teknologi.....	3
2.2.2 Utregning solceller.....	4
2.3 Vindturbin	5
2.3.1 Kapasitetsfaktor	5
2.3.2 Effektkurve	5
2.3.3 Årsproduksjon.....	6
2.4 Elektrolyse	6
2.4.1 Effektivitet	8
2.5 Brenselcelle.....	9
2.5.1 Virkemåte.....	10
2.5.2 Effektivitet	10
2.5.3 Hydrogenforbruk og maks teoretisk effekt	12
2.5.4 PEM brenselcelle	12
2.5.5 AFC brenselcelle.....	13
2.6 Overføring og kompresjon av hydrogen	14
2.7 Batteri.....	14
2.8 Kostnader	15
2.8.1 LCOH.....	16
2.9 Energiinnhold i diesel, hydrogen og batteri	17
3 Metode	18
3.1 Caser	19
3.1.1 Case 1.....	19
3.1.2 Case 2.....	20
3.1.3 Case 3.....	20

3.2	Produksjonsprofil vind- og solkraft	20
3.2.2	Vindkraft.....	20
3.2.2	Solkraft.....	22
3.3	Fordeling av produsert energi	24
3.3.1	Fornybar energikilde	24
3.3.2	Årlig energiforbruk	24
3.4.1	Elektrolyse	26
3.5	Fordeling produsert hydrogen.....	26
3.6	Kostnader	28
3.7	Prosentvis forbruk av strøm	29
3.8	Prosentvis forbruk drivstoff	30
4	Resultater.....	31
4.1	Samlede resultater.....	31
4.2	Årlig forbruk strøm og drivstoff	32
4.3	Energiproduksjon vindmøller	32
4.3.1	Årlig produksjon	32
4.3.2	Produksjon per måned.....	33
4.4	Energiproduksjon solceller	34
4.4.1	Årlig-produksjon.....	34
4.4.2	Produksjon per måned.....	34
4.5	Fordeling produsert energi.....	35
4.6	Hydrogenproduksjon.....	37
4.6.1	Produksjon hydrogen per måned.....	37
4.6.2	Årlig produksjon hydrogen	37
4.7	Fordeling produsert hydrogen.....	38
4.7.1	Årlig produksjon brenselcelle	40
4.7.2	Årsproduksjon drivstoff hydrogen 350 bar	40
4.8	Utnyttet energi i hydrogenmotor og dieselmotor.....	41
4.8.1	Årlig energibehov til drivstoff	41
4.9	Kostnader	42
4.10	LCOH.....	44
4.11	Kostnad per kWh	44

5	Diskusjon	45
5.1	Caser	45
5.1.1	Case 1	45
5.1.2	Case 2	45
5.1.3	Case 3	46
5.2	Lønnsomhet	46
5.3	Bærekraft	46
5.4	Usikkerhet	47
6	Konklusjon	48
6.1	Videre arbeid	49
	Referanseliste	50
	Vedlegg	54
A	Begninger kapasitetsfaktor og årsproduksjon vindkraft	54
B	Begninger kapasitetsfaktor og årsproduksjon solkraft	55
B	Effektkurve Vestas V27 vindturbin	56
C	Tabeller vindforhold og produksjon, NVE	56
D	Beregninger årsproduksjon brenselcelle	57
F	Beregninger LCOH	58
G	Graf PV solceller	59
H	Produksjonsprofil	60
I	Kostnader	61
J	Poster	62
K	Prinsippskisse forprosjekt	63
L	Forprosjekt	64

Liste over figurer

Figur 1 Geografisk plassering på casene [1].	2
Figur 2 Oppbyggingen av solceller i solcelleanlegg [3].	3
Figur 3 Multikrystalliske solceller til venstre og monokrystalliske solceller til høyre [4].	4
Figur 4 Illustrasjon av cellen i AEM- og PEM elektrolysører [10]	7
Figur 5 Plassering på stackene i elektrolyseren.	8
Figur 6 Illustrasjon av et elektrolysesystem [11].	8
Figur 7 Skjematisk fremstilling av en brenselcelle [14].	10
Figur 8 Energieffektivitet med strøm som utgangspunkt mellom batteri og brenselcelle [15].	11
Figur 9 Energieffektivitet naturgass som utgangspunkt mellom batteri og brenselcelle [15].	11
Figur 10 Illustrasjon av en PEM brenselcelle [17].	13
Figur 11 Illustrasjon av en AFC-brenselcelle [19].	13
Figur 12 Energitap for mekanisk kompresjon av hydrogen [13].	14
Figur 13 Batterilagringen ved Remote Prosjekt sitt anlegg på Rye i Trøndelag.	15
Figur 14 Fremgangsmåte for LCOH-analyse.	17
Figur 15 Presenterer flyten i metoden.	18
Figur 16 Produksjonsmetoden til case 1.	19
Figur 17 Produksjonsmetoden til case 2.	20
Figur 18 Produksjonsmetoden til case 3.	20
Figur 19 Prosentvis fordeling av energiproduksjon Hitra 2 [21]	21
Figur 20 Prosentvis fordeling av energiproduksjon Geitfjellet [21]	22
Figur 21 Energiinnstråling fra solen per måned i case 2 [23]	23
Figur 22 Data over solforhold, systemtap, systemparametere, årlig energiproduksjon [23]	23
Figur 24 Energiinnstråling fra solen per måned i case 3 [23]	23
Figur 23 Data over solforhold, systemtap, systemparametere, årlig energiproduksjon [23]	23
Figur 25 Produksjonsprofilen til hydrogen.	25
Figur 26 Prosentvis forbruk av strøm per måned.	29
Figur 27 Prosentvis forbruk av drivstoff per måned.	30
Figur 28 Fordeling produsert energi i case 1.	35
Figur 29 Fordeling produsert energi i case 2.	36
Figur 30 Fordeling produsert energi i case 3.	36
Figur 31 Hydrogenproduksjon per måned.	37
Figur 32 Fordeling av produsert hydrogen i case 1.	38

Figur 33 Fordeling av produsert hydrogen i case 2.	39
Figur 34 Fordeling av produsert hydrogen i case 3.	39
Figur 35 Drivstoffproduksjon per måned.	40
Figur 36 Effektkurve Vestas V27 vindturbin.....	56
Figur 37 Installert effekt og årsproduksjon fra vindkraft i Trøndelag.	56
Figur 38 Beregning av årsproduksjon brenselcelle.....	57
Figur 39 Beregning av årsproduksjon drivstoff H ₂	57
Figur 40 Utregning av LCOH.	58
Figur 41 PV energi i case 2.....	59
Figur 42 PV energi i case 3.....	59
Figur 43 Produksjonsprofil og energibehov i systemet [39].....	60
Figur 44 Beregninger av kostnader.....	61
Figur 45 Poster.	62
Figur 46 Prinsippskisse som ble utarbeidet i forprosjektet.....	63
Figur 47 Gantt-diagram.....	70

Liste over tabeller

Tabell 1 Energiinnholdet til ulike energibærere [15] [18].	17
Tabell 2 Teknisk data for Vestas V27 turbin [20].	21
Tabell 3 Teknisk data for solcellepanelet REC TP2 multikrystallisk [22].	22
Tabell 4 Årlig dieselforbruk basert på plassering [24].	24
Tabell 5 Årlig strømforbruk til 4 gårdsbruk [25].	25
Tabell 6 Teknisk data for PEMEL C20 elektrolyser fra NEL [26].	26
Tabell 7 Teknisk data for FCveloCity - HD100 PEM brenselcelle fra Ballard [27].	27
Tabell 8 Kostnader for komponenter i casene [20] [22] [28] [29].	28
Tabell 9 Samlede resultater.	31
Tabell 10 Årlig strømforbruk. Tabell 11 Årlig dieselforbruk.	32
Tabell 12 Årlig energiproduksjon fra vindkraft i case 1 og 2.	33
Tabell 13 Energiproduksjon per måned fra vindkraft i case 1 og 2.	33
Tabell 14 Årlig energiproduksjon fra solkraft i case 2 og 3.	34
Tabell 15 Energiproduksjon per måned fra solkraft i case 2 og 3.	34
Tabell 16 Årlig produksjon av hydrogen.	37
Tabell 17 Årlig produksjon til brenselcelle.	40
Tabell 18 Årlig drivstoffproduksjon.	41
Tabell 19 Årlig energibehov til drivstoff.	41
Tabell 20 Kostnadene til casene gjennom livsløpet [31] [32] [33] [34] [35].	42
Tabell 21 Resulterende LCOH.	44
Tabell 22 Resulterende kostnad per kWh utnyttet energi.	44
Tabell 23 Budsjettforslag.	70

Forkortelser

LCOH – Levelized Cost of hydrogen

PVGIS – Photovoltaic geographical information system

NVE – Norges vassdrags- og energidirektorat

kW – Kilowatt

kWp – Kilowatt-peak

kWh – Kilowatttime

MWh – Megawatttime

TWh – Terawatttime

NOK – Norsk krone

PV – Fotovoltaisk effekt

m² – Kvadratmeter

CO₂ – Karbondioksid

PEM – Proton-utvekslet membran

PEMEL – Proton-utvekslet membran elektrolyse

AEL – Alkalisk elektrolyse

DC – Likestrøm

AFC – Alkalisk brenselcelle

NNV – Nettonåverdi

Bar – Måleenhet for trykk

V – Volt

A – Amper

kg – Kilogram

1 Innledning

Mye av klimafotavtrykk i landbruket kan knyttes til drivstoff- og energiforbruk. Energien som brukes til drivstoff og til oppvarming av bygninger kommer ofte fra diesel og gass, dette fører til høyt utslipp av klimagasser. Ved å erstatte energibehovet fra diesel og gass med grønt hydrogen, vil klimafotavtrykket reduseres betydelig fordi selve prosessen med å produsere grønt hydrogen ikke medfører klimafotavtrykk. Hydrogen har unike egenskaper til å være energibærer og har derfor et stort potensial innen fornybar energiproduksjon [33]. Oppgaven omhandler analyse av flere anlegg som benytter fornybar energi til å produsere grønt hydrogen gjennom vørelektrolyse, som videre benyttes til produksjon av strøm og drivstoff. Denne oppgaven vil derfor se nærmere på følgende problemstilling:

Hvilket potensial har hydrogen til å være energibærer i et energiproduserende anlegg basert på fornybar energi innen landbruk? Hvor lønnsomt er det å konvertere elektrisk energi til hydrogen, og videre bruke denne innen drivstoff eller til å produsere elektrisk energi?

Hydrogen som drivstoff og energibærer er spesielt interessant på grunn av hydrogen sin høye energitetthet. Ved produksjon av energi fra fornybare energiresurser som sol- og vindkraft, vil det være et behov for regulering og lagring av energi ved over- og underproduksjon. Både sol- og vindkraft er to aktuelle energiresurser, på grunn av den politiske viljen på området. Verden skal over fra fossile- til fornybare energiresurser innen kort tid for å nå FN's bærekraftsmål [36]. Samfunnsmessig er det store fordeler med hydrogen. Hydrogen som drivstoff vil være tidsbesparende, samt vektbesparende sammenlignet med batteri, noe som er fordelaktig i transportsektoren og landbruket [33].

Oppgaven tar utgangspunkt i tre ulike caser, med ulik kombinasjon av fornybare energikilder. Case 1 baserer seg på vindkraft plassert på Hitra i Trøndelag, case 2 baserer seg på vind- og solkraft i kombinasjon plassert på Innherred i Trøndelag, og case 3 baserer seg på solkraft plassert på Toten i Innlandet. Produsert energi lagres først i batteri, videre blir energien fordelt til drift eller hydrogenproduksjon. Produsert hydrogen lagres og blir videre fordelt til strøm gjennom brenselcelle eller til drivstoff gjennom kompresjon til 350 bar.

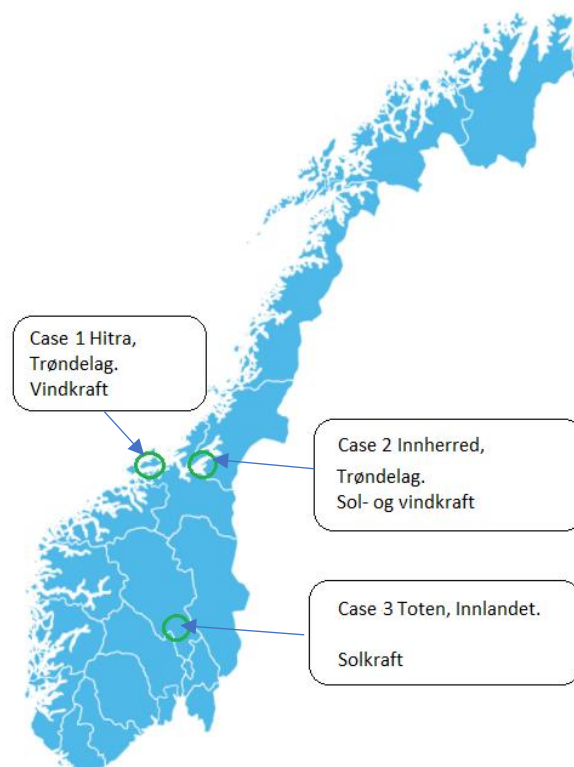
Formålet med oppgaven er å belyse potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk gjennom å kartlegge fordeler og ulemper med slike enkeltstående anlegg. I casene beregnes det LCOH for hvert anlegg, samt pris per kWh benyttet energi, noe som fører til et godt sammenligningsgrunnlag for de ulike casene og opp mot dagens priser.

2 Teori

Kapittelet teori har som hensikt å gjøre rede for relevant teoretisk kunnskap til oppgaven. Teorien skal gi tilstrekkelig informasjon for å forstå de ulike komponenters virkemåte og videre metoden i kapittel 3.

2.1 Geografisk plassering

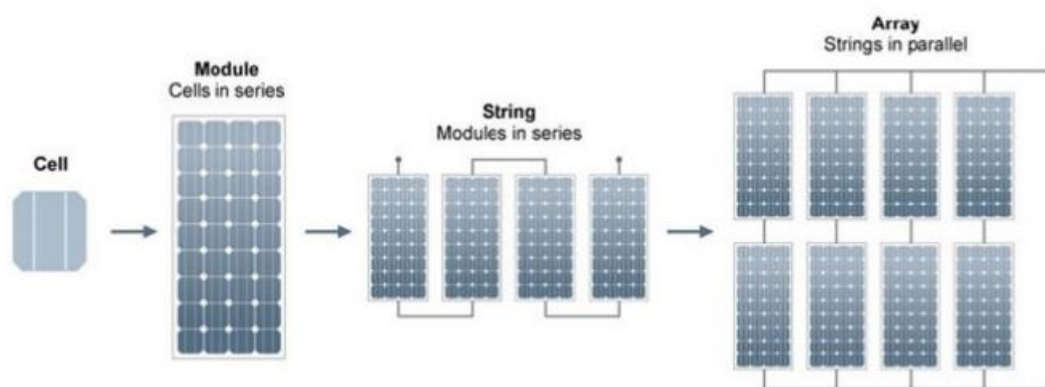
I oppgaven tas det utgangspunkt i anlegg plassert på tre steder i Norge; Hitra, Innherred og Toten. Det er ønskelig å se på plasseringer med ulike forutsetninger med tanke på sol- og vindforhold. Trøndelag har et godt potensial innen både sol- og vindkraft, samt relevant på bakgrunn av stor aktivitet innen landbruk. Innlandet har gode solforhold, mens Hitra har svært gode vindforhold, derfor er vindkraft å foretrekke som fornybar energikilde her. Figur 1 viser geografisk plassering på casene.



Figur 1 viser geografisk plassering på casene [1].

2.2 Solceller

Solceller konverterer energien til solstråler fra sola til elektrisitet, ved hjelp av PV (fotovoltaiske effekten). Solcellepanel består av flere solceller, og solcelleanlegg består av flere solcellepanel, se Figur 2 [2]. Solceller benyttes blant annet i solcelleparker, på bygg og som strømkilde i områder under kraftnett. I denne oppgaven skal solcellene benyttes til produksjon av elektriske energi, som videre kan brukes til produksjon av hydrogen.



Figur 2 viser oppbyggingen av solceller i solcelleanlegg [3].

I Norge leverer solceller rundt 100 – 170 kWh strøm/m² solcelleareal og et solcelleanlegg har en produksjon på rundt 650 – 1000 kWh per installert kWp per år. Produksjonen av energi er avhengig av plassering, orientering, helningsvinkel, anleggets effektivitet og systemløsning. Levetiden på en solcelle er rundt 25-30 år med dagens teknologi.

2.2.1 Bærekraft og teknologi

Solceller er bærekraftige systemer uten direkte utslipp av CO₂ i løpet av driftstiden. Under produksjon og resirkulering vil det forekomme indirekte utslipp av CO₂, disse utslippene er vesentlig lavere enn de som unngås. Solceller er energikrevende å fremstille, grunnet fremstilling av rent silisium. Normalt tar det under to år for en solcelle å produsere samme mengde energi som kreves til produksjon. Med en normal driftstid på 25-30 år, medfører dette at solceller ofte er lønnsomme investeringer innen fornybar energi.

Dagens marked består av to hovedtyper solceller; silisium og tynnfilm. Den mest utbredte solcelleteknologien bygger på solceller laget av silisium. Monokrystalliske solceller blir produsert av en silisiumkrystall, dette medfører at overflaten blir homogen og ofte svart slik at alt tilgjengelig sollys absorberes i solcellen. Multikrystalliske solceller har flere krystallkorn, noe som fører til det kjente fargespillet i solpanelet, se Figur 3. Monokrystallinske solceller har teoretisk en høyere effektivitet, på den andre siden krever multikrystalliske solceller mindre energi å produsere, noe som fører til lavere pris ved samme oppgitte effekt. Solcellepaneleffektivitet er på 15 – 20% [2].



Figur 3 viser multikrystalliske solceller til venstre og monokrystalliske solceller til høyre [4].

Produksjonen til et solcelleanlegg er avhengig av disse faktorene; [5] [2]

- Solenergi og solstråling
- Breddegrad - retning
- Vær - nedbør/snø
- Solcelletype – teknologi
- Temperatur
- Innstrålingsvinkel og helling

2.2.2 Utregning solceller

Installert effekten til et solcelleanlegg er gitt av formelen: [6]

$$P = \text{solstråling} \cdot \text{areal} \cdot \text{effektivitet} \quad (1)$$

Årlig produksjon til et solcelleanlegg er gitt av formelen: [6]

$$\text{Årlig produksjon} = \text{kapasitetsfaktor} \cdot \text{effekt} \cdot 8760 \text{ timer i året} \quad (2)$$

Effektiviteten til solcelleanlegget er gitt av følgende formler: [6]

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{inn}} \quad (3)$$

P_{ut} = solenergien som omdannes til elektrisk energi

P_{inn} = Utstrålt solenergi som treffer solcellen

$$\eta_{celle} = \frac{P_{el}}{P_{sol}} = \frac{U \cdot I}{\varphi_{inn} \cdot A} \quad (4)$$

η_{celle} = solcellepanelets effektivitet

P_{el} = elektrisk kraft som tilføres av solcelle [W]

P_{sol} = utstrålt effekt av solen [W]

A = effektivt solcelleareal [m²]

φ_{inn} = gjennomsnittlig utstrålt lysintensitet på solcellen [W/m²]

2.3 Vindturbin

2.3.1 Kapasitetsfaktor

Kapasitetsfaktoren til en vindmølle er forholdet mellom årsproduksjon og teoretisk maksimal produksjon.

$$C_p = \frac{\text{Årlig energiproduksjon}}{\text{Teoretisk maksimal energiproduksjon}} \quad (5)$$

Kapasitetsfaktoren er avhengig av vindforholdene og effektkurven til vindturbinen. Hvis vindturbinen har effektkurve som produserer kraft over et større område av vindhastigheter, vil kapasitetsfaktoren øke [7].

Kapasitetsfaktoren for norske vindkraften var i 2021 på 32,9%, med en årlig produksjon på 11,8 TWh som står for 7,5 prosent av samlet kraftproduksjon i Norge [8].

2.3.2 Effektkurve

Teoretisk maksimalt effektpotensial som kan utvinnes av vind i en vindturbin er gitt av følgende formel:

$$P_{VT} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot v^3 \quad (6)$$

ρ = Lufttetthet [kg/m³] A = Omfeid propellareal [m²]

C_p = Effektkoeffisient v = Vindhastighet [m/s]

Effektkurven forteller hvor mye elektrisk kraft en vindmølle kan produsere som funksjon av gitt vindhastighet. Effektkurven vil variere fra ulike turbiner og er avhengig av størrelse på turbin, girboks, kraftelektronikk, generator og navhøyde. Fra Betz lov har vi at effektkoeffisienten C_p har en maksimal verdi på 59,3%, i praksis vil denne være på rundt 25-45% [9] [10].

2.3.3 Årsproduksjon

Årsproduksjon av energi regnes ved bruk av tabeller med årsfordeling av vindhastigheter i det aktuelle området. Videre brukes effektkurven til den aktuelle turbinen for å lese av effekt ved gitt vindhastighet. Årsproduksjon er gitt av følgende formel:

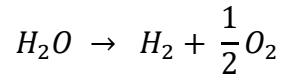
$$\text{Årsproduksjon} = \Sigma (P \cdot t) \quad (7)$$

P = Effekt t = tid [timer]

Alle vindhastigheter summeres som produkt mellom effekt P og tid timer. Videre kan kapasitetsfaktor og brukstid regnes. Tabeller med årlig fordeling av vindhastigheter inneholder årets 8760 timer [10].

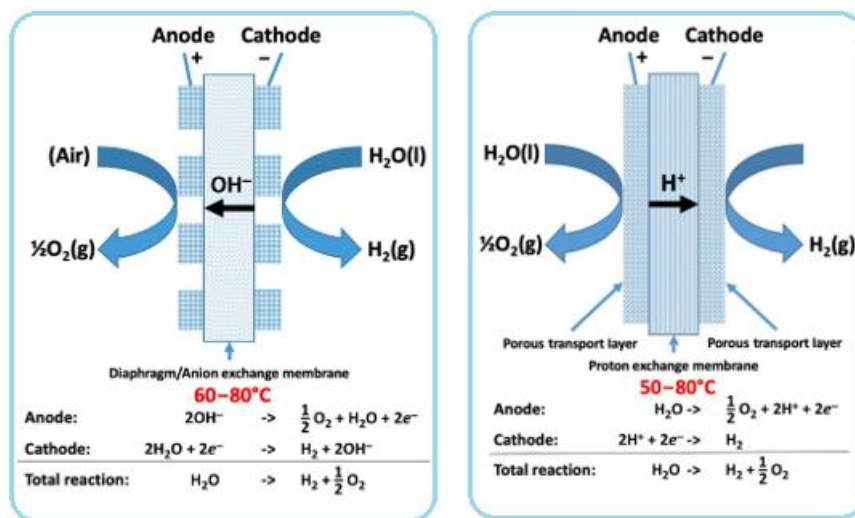
2.4 Elektrolyse

Grønt hydrogen produseres gjennom en prosess som kalles våtelektrolyse. Dette er en kjemisk prosess der man splitter vannmolekyl (H₂O) til hydrogen H₂ og oksygen ½ O₂. Elektrolysen følger følgende kjemisk reaksjon:



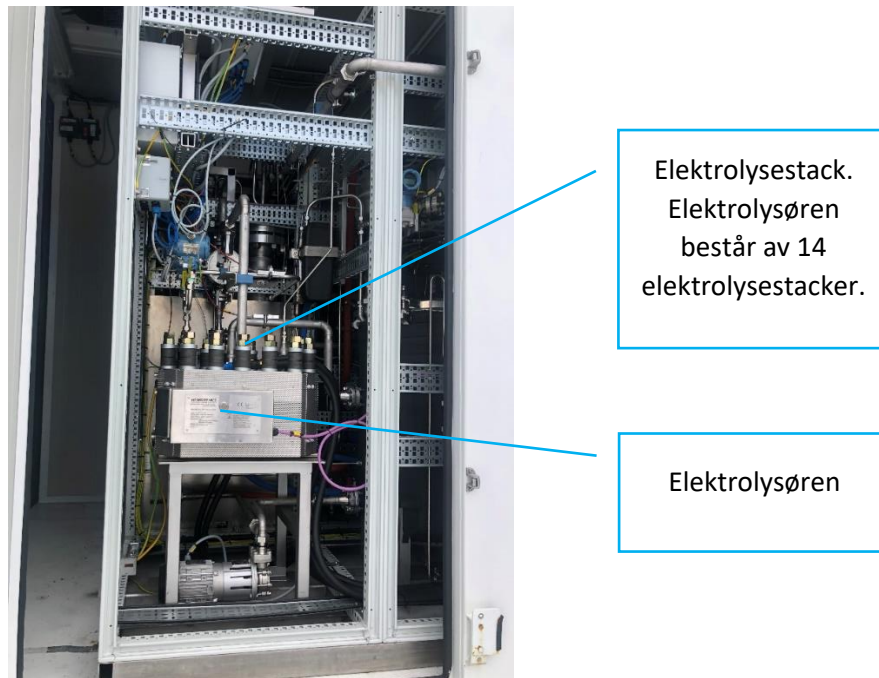
Selve elektrolysøren kan deles inn i tre hoveddeler:

- **Cellen:** Cellen er kjernen i elektrolysemaskinen, det er her den elektrokjemiske prosessen forekommer. Cellen består av en katode og en anode, disse er enten plassert på hver sin side av en protonledende membran (PEM), eller i en elektrolytt som kaliumhydroksid (AEL). Videre er det plassert to porøse transportlag inn mot hver elektrode som vil transportere reaktantene (hydrogen og oksygen). Ved transportlagene er det også plassert en bipolar plate som gir mekanisk støtte til cellen og har som funksjon å transportere reaktantene, se Figur 4 [10].



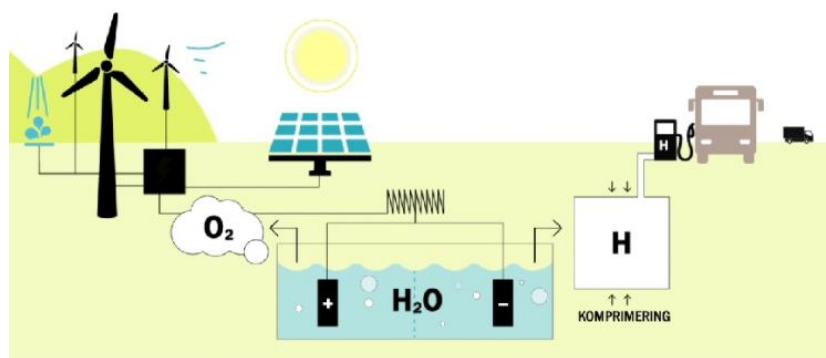
Figur 4 illustrasjon av cellen i AEM- og PEM elektrolysører [10]

- **Stack:** Ovenfor er en elektrolysecelle beskrevet. En elektrolysestack består av en samling av seriekoblede elektrolyseceller. For å adskille, hindre lekkasje og gi mekanisk styrke består en elektrolysestackene av rammer og materialer egnet til formålet. Figur 5 viser plassering på stacker [10].



Figur 5 viser plassering på stackene i elektrolysøren.

- **System:** Systemet i et elektrolyseanlegg består av elektrolysestacken, samt alle komponenter som kreves i et komplett anlegg. Komponenter som ofte er inkludert i et slikt system er energiresurs, transformator, likeretter, ferskvannssystem, gass separator, kjølingssystem, kompressor og rensesystem til ferskvann [10].



Figur 6 illustrerer et elektrolysesystem [11].

2.4.1 Effektivitet

Et elektrolyseanlegg har en typisk effektivitet på 60-80% [12]. Effektiviteten til anlegget vil variere ut ifra hvordan anlegget kjøres. Effektiviteten synker når:

- Anlegget kjøres på lav last.
- Høyt trykk i systemet.
- Temperaturen er lav.
- Strømtetthet er økende.

I lavtemperatur elektrolyse (PEMEL og AEL) er operasjonstemperaturen på 60-90°C. Temperaturen i et elektrolyseanlegg er satt høyt, siden det gir høyere effektivitet, men med høyere temperatur vil anlegget degraderes raskere.

Med høy strømtetthet vil hydrogenproduksjonen øke per volum, dette fører til større slitasje på anlegget, samt høye operasjon- og vedlikeholdskostnader. Ved lav strømtetthet vil kostnader på anlegget øke, grunnet langsommere produksjon. Valg av strømtetthet baserer seg på disse sentrale parameterne.

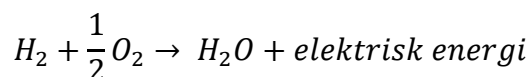
Strømtetthet og temperatur påvirker effektivitet til anlegget i størst grad. Med økende trykk i anlegget påvirker effektiviteten direkte, fordi Faradays effektiviteten synker. DC-effektiviteten (stack – effektiviteten) er produktet av effektiviteten til cellespenning på arbeidsområdet og Faradays effektiviteten. Virkningsgraden til elektrolysører kommer til å øke i årene fremover, og det er antatt at PEM-elektrolyttene vil få en virkningsgrad på hele 94% i fremtiden [12].

I oppgaven blir det sett på to ulike typer elektrolyseanlegg; AEL og PEMEL. AEL er den rimeligste teknologien, men mer plasskrevende anlegg grunnet lav strømtetthet. Det er også nødvendig med regelmessig påfylling av kaliumhydroksid på AEL-anlegg.

PEMEL er en elektrolyseteknologi som kun trenger vann (H₂O) og elektrisk energi for å produsere hydrogen. I PEMEL-anlegg blir hydrogengassen trykksatt til 30 bar, mens oksyngassen holdes under atmosfærisk trykk. Før lagring vil trykket på hydrogengassen som benyttes til drivstoff bli ytterligere økt ved bruk av en kompressor [13].

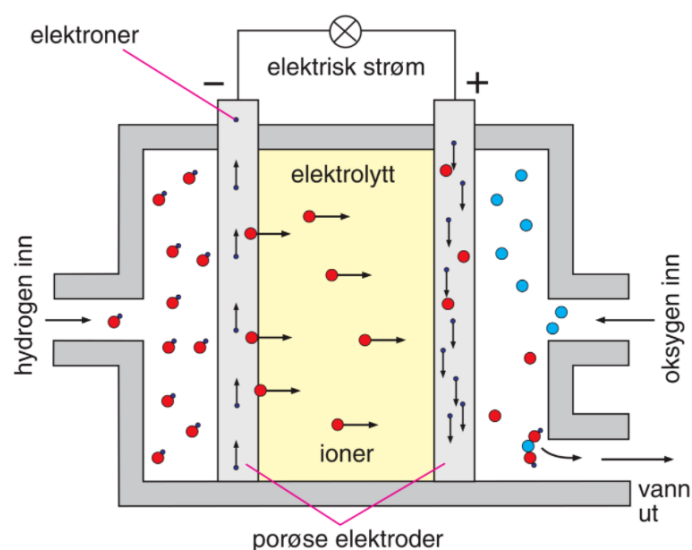
2.5 Brenselcelle

For å lage elektrisk energi av hydrogen H₂ benyttes en brenselcelle til konvertering. I en brenselcelle vil elektrisk energi genereres gjennom spontane elektrodereaksjoner. Brenselcellen følger følgende kjemisk reaksjon:



2.5.1 Virkemåte

Hydrogen som kan karakteriseres som brensel pumpes inn og mot en av de to elektrodene (anoden), og ioniseres ved å avgi elektroner, som gir elektrisk energi. Videre driver de positive hydrogenionene mot den andre elektroden (katoden) og danner vann H_2O ved å slå seg sammen med negative oksygenioner. De to elektrodene er nedsenket i en elektrolytt, som binder elektrodene sammen og gjør reaksjonen mulig. Det er vanlig å bruke oksygen som oksidasjonsmiddel i prosessen. De porøse elektrodene er koblet sammen med elektriske ledninger. Elektronene vil gå i de elektriske ledningene, mens protonene i hydrogenatomet vil gå gjennom membranen og reagere med oksygenet [14]. Se Figur 7.



Figur 7 viser en skjematisk fremstilling av en brenselcelle [14].

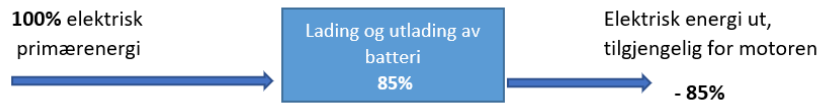
2.5.2 Effektivitet

Effektiviteten til en brenselcelle ligger typisk på 50-65%. Tapene kommer av hastighetsbegrensninger for elektrodereaksjonen, og av spenningstap fra strømmen som går gjennom elektrolytten. Disse tapene fører til varmeutvikling, som kan brukes til andre formål som oppvarming. Varmeutvikling kan også brukes til å varme opp transportmidler, noe som øker rekkevidde i nordisk klima. Dette gjør at den totale energiutnyttelsen under optimale

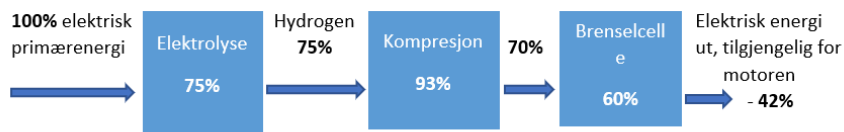
forhold kan regnes å komme opp mot 80-90% [14]. Figur 8 og Figur 9 sammenligner effektiviteten i anlegg med naturgass og strøm som energikilde.

Energieffektivitet med strøm som utgangspunkt:

Batterier:



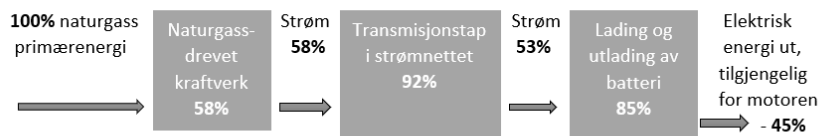
Brenselceller:



Figur 8 viser energieffektivitet med strøm som utgangspunkt mellom batteri og brenselcelle [15].

Energieffektivitet med naturgass som utgangspunkt:

Batterier:



Brenselceller:



Figur 9 viser energieffektivitet med naturgass som utgangspunkt mellom batteri og brenselcelle [15].

Effektivitet er avgjørende for en bærekraftig energikilde. Det er ønskelig å få mest mulig energi ut av tilgjengelig energiressurser. Hvis man sammenligner batteri med brenselcelle (se Figur 9) med strøm som utgangspunkt, er utnyttet energi i batteri dobbelt så høyt sammenlignet med brenselcelle. Derimot hvis man sammenligner med basis i naturgass, er utnyttet elektrisk energi tilnærmet lik for de to prosessene. Naturgass er en viktig energikilde i verden, og med ny teknologi innen CO₂-fangst, kan hydrogen være en viktig ressurs innen energiproduksjon.

2.5.3 Hydrogenforbruk og maks teoretisk effekt

Hydrogenforbruket til brenselcellen beregnes med følgende formel fra Faradays lov:

$$H_{H_2} = \frac{1}{\eta \cdot F \cdot \gamma} \quad (8)$$

η = virkningsgrad F = kraft γ = gassutnyttelse

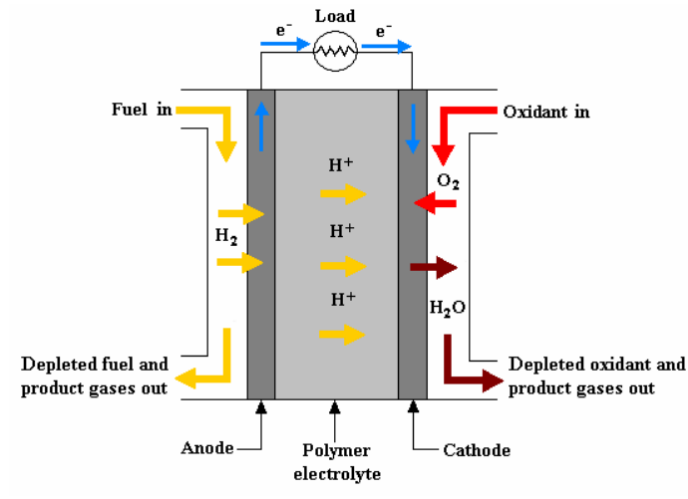
Maksimal teoretisk effekt basert på LHV i en PEM-brenselceller er gitt ved følgende formel:

$$P_{maks} = (N_{H_2}) \cdot \left(242 \frac{kJ}{mol}\right) \quad (9)$$

P_{maks} = Maks effekt N_{H_2} = Molvekt hydrogen

2.5.4 PEM brenselcelle

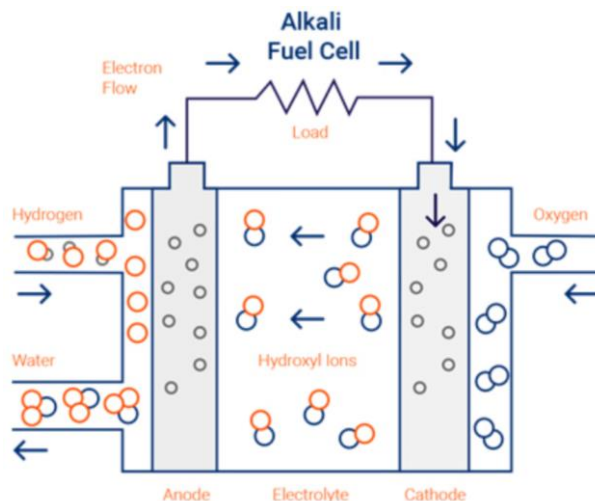
Proton – utveksling membran brenselcelle (PEMFC), også kjent som polymer electrolyte membran (PEM), er en brenselcelle som hovedsakelig utvikles for transportapplikasjoner, men også for stasjonære- og bærbare applikasjoner. PEM brenselceller kjennetegnes ved lavere driftstemperatur på mellom 50 til 100°C, og en spesiell protonledende polymerelektrolyttmembran. PEMFC brenselceller genererer elektrisitet, og opererer på motsatt prinsipp som PEM elektrolyser. Denne metoden er en av flere kandidater til å erstatte den alkaliske brenselcelleteknologi. Den praktiske effektiviteten til en PEM brenselcelle er rundt 40-60%. Rent teoretisk kan en PEM – brenselcelle operere med en effektivitet på 83%. Effektiviteten på systemet kan nå 60-80% hvis det tas høyde for elektrisk- og termisk energi [16]. Figur 10 illustrere en PEM brenselcelle.



Figur 10 illustrerer en PEM brenselcelle [17].

2.5.5 AFC brenselcelle

Alkaliske brenselceller (AFC) er en av de mest utviklede brenselcelleteknologiene. Disse brenselcellene bruker hydrogen til å produsere elektrisitet, varme og drikkevann. Brenselcellen er en av de mest effektive på markedet med et potensial på 70%. AFC brenselcellen har en typisk effektivitet på 50-60%, og en teoretisk effektivitet opp mot 87% kombinert med termisk- og elektrisk energi [18]. Figur 11 illustrere en AFC-brenselcelle.

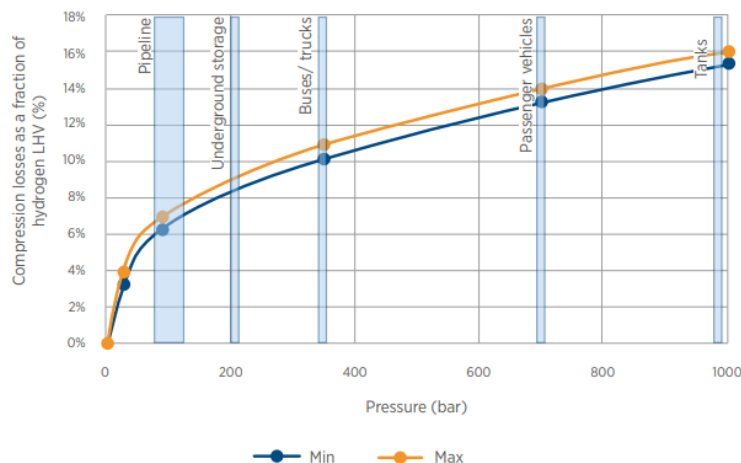


Figur 11 illustrerer en AFC-brenselcelle [19].

2.6 Overføring og kompresjon av hydrogen

Ved lagring av hydrogen som drivstoff må gassen komprimeres, denne prosessen krever en betydelig mengde energi. Operasjonstrykket i et elektrolyseanlegg ligger på 30-70 bar, denne elektrokjemiske prosessen har et lavere tapsledd enn ved mekanisk kompresjon. For å oppnå lavest effektbruk i kompresjon, vil elektrolysen bistå med første steg i kompresjonen og videre vil mekanisk kompresjon bli benyttet til å komprimere til ønsket trykk.

Figur 12 viser tap i overføring som følge av mekanisk kompresjon etter elektrolysen. Skal hydrogen gassen brukes til å lage elektrisk energi, vil en kompresjon på 30-70 bar være gunstig. Skal gassen brukes til drivstoff vil en kompresjon på 300-700 bar være gunstig. Her vil tapet i energi øke, derfor bør gassen lagres med ulikt trykk med tanke på bruksområde.



Figur 12 viser energitap for mekanisk kompresjon av hydrogen [13].

2.7 Batteri

Kraftproduksjonen fra sol- og vindkraft vil variere etter vindstyrke og solforhold. Det vil derfor være et behov for korttidslagring av energi i perioder med høy produksjon, og videre benytte lagret energi ved lav produksjon. Ved kortvarig energilagring vil batteri være den mest gunstige løsningen, grunnet rask responstid og bra effektivitet. Ved behov for lagring av energi over lengre perioder, vil lagring gjennom hydrogen være beste løsning. Hydrogen har en unik evne

ved lagring, siden tapet av energi er svært lavt, og hydrogen har høy energitetthet. Sammenlignet med batteri vil energitapet her være betydelig lavere over lengre tidsperioder.



Figur 13 viser batterilagringen ved Remote Prosjekt sitt anlegg på Rye i Trøndelag.

Den ledende batteriteknologien bygger i dag på litiumbatterier, på grunn av høy energitetthet og lite tap av energi. Batteriteknologien har utviklet seg mye de siste årene, noe som har ført til lave kostnader og bedre kapasitet. Et litiumbatteri består av elektrolytisk løsning, elektrodeseparator, anode og katode. Litiumbatteri er sekundære batterier, det vil si at prosessen reverseres og batteriet kan brukes flere ganger. Litium har høyest normalpotensial av alle metaller på 3.05V, som medfører at litiumbatterier har høyere cellespenning og energitetthet enn primære batterier.

2.8 Kostnader

Prosjekter har ofte kostnader som fordeler seg over en lengre tidsperiode, det er derfor nødvendig å systematisere kostnadene. Ved bruk av livssyklus-kostnader summeres alle kostnader som påløper i løpet av prosjektet, det vil si fra prosjektplanlegging til prosjektavvikling. Vanligvis inneholder en livssyklus disse punktene; Kostnader før byggestart, kostnader til deler og komponenter, kostnader til installasjon, kostnader til drift og vedlikehold og kostnader med avvikling [13].

Nåverdi

I et prosjekt vil det påløpe kostnader gjennom hele livssyklusen. Verdien av en krone nå og om 30 år er ikke lik, det er derfor nødvendig med en metode for å regne på nåverdien til prosjektet. Nåverdimetoden benyttes for å diskontere pengebruken tilbake til prosjektstart. For å bruke denne metoden benyttes en fast diskonteringsrente, som vil variere på ulike prosjekt. Diskonteringsrenten er avhengig av risikoen knyttet til prosjektet. For å finne nettonåverdien til et prosjekt brukes følgende formel [18].

$$NNV = -G + \sum_t^{N_e} \frac{a_t}{(1+r)^t} + \frac{S}{(1+r)^{N_e}} \quad (10)$$

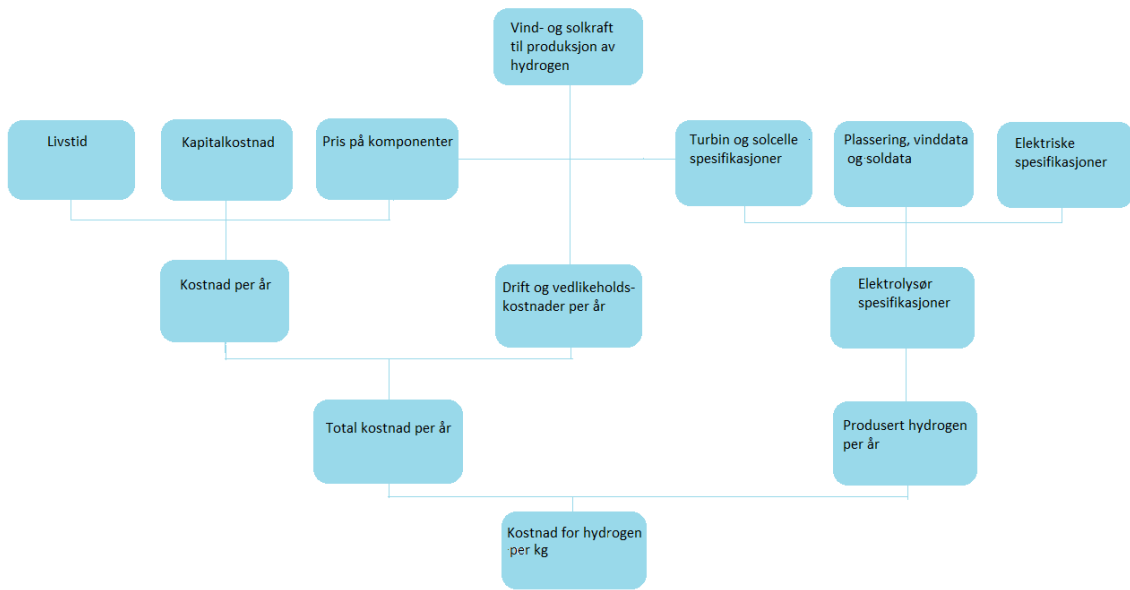
NNV = nettonåverdi G = grunninvestering t = tid fra t til N_e
 a_t = kontantstrøm/kostnader S = restverdi r = diskonteringsrente

2.8.1 LCOH

Levelized Cost of Hydrogen er en metode som muliggjør en felles kostnadsberegning basert på euro per kg hydrogen. LCOG-analyse innebærer alle kostnader som påløpet hvert år i livsløpet, disse kostnadene diskonteres og summeres. Videre vil kostnadene sammenlignes med den diskonterte produksjonen. En slik sammenligning vil gi en kontant kostnad per kg hydrogen, se Figur 14. For å finne LCOH benyttes følgende formel [13].

$$LCOH = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{K_t + D_t + A_t}{(1+r_i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{m_{H_2}}{(1+r_i)^t}} \quad (11)$$

LCOH = Levelized Cost of Hydrogen [€/kg] K_t = Kapitalutgifter (t) [euro]
 D_t = Årlige driftsutgifter (t) [euro] A_t = Avviklingsutgifter (n+1) [euro]
t = Hvert individuelle år i prosjektet n = Levetid til prosjektet
 r_i = Gj.snitt kapitalkostnad [%] m_{H_2} = Produsert hydrogen pr år [kg]



Figur 14 viser fremgangsmåte for LCOH-analyse.

2.9 Energiinnhold i diesel, hydrogen og batteri

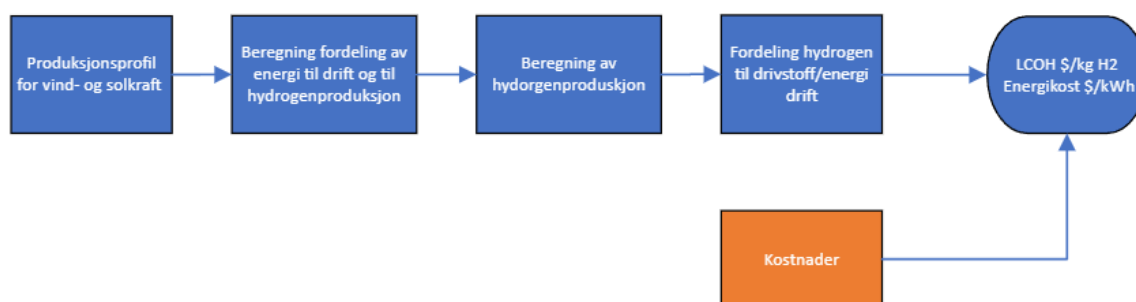
Tabell 1 viser energiinnholdet til ulike energibærere [15] [18].

<i>Drivstoff</i>	<i>Energiinnhold</i>
<i>Diesel 1 liter</i>	10,1 kWh
<i>Hydrogen 1 kg ved 30 bar</i>	33,3 kWh
<i>Hydrogen 1 kg ved 350 bar</i>	33,3 kWh
<i>Batteri 1 kg</i>	0,15 kWh

Energiinnhold er sentralt når effektiviteten mellom energikilder sammenlignes. Moderne dieselmotorer har en virkningsgrad på 38-42%, mens virkningsgraden på en elmotor er rundt 90%. I et hydrogendrevet kjøretøy benyttes elmotorer, og derfor kommer effektiviteten på 90% ovenpå effektiviteten til brenselcellen [18].

3 Metode

I denne delen av oppgaven vil teorien fra kapittel 2 bli brukt til å presentere metoden som benyttes til å løse problemstillingen. Figur 15 viser flyten til metoden.



Figur 15 presenterer flyten i metoden.

Produksjonene skal tilpasses etter energibehovet til de 3 casene. Casene har ulike former for fornybare energikilder, og anlegg må derfor dimensjoneres ulikt. Innledningsvis genereres en produksjonsprofil basert på sol- og vinddata. Videre vil vind- og soldataen benyttes til å beregne årlig energiproduksjon. Basert på energiforbruk og energiproduksjon i de ulike casene vil energien bli fordelt til drift og korttidslagring ved hjelp av batteri eller direkte til produksjon av hydrogen, der hydrogen benyttes som energibærer. Ut ifra disse parameterne dimensjoneres størrelse på batteri og elektrolyseanlegg.

Til slutt fordeles produsert hydrogen til to formål; drivstoff og strøm til drift. Casene har gitte energibehov til drivstoff, samt energi til drift gjennom hele året. Ved hjelp av disse parameterne kan størrelse på brenselcelle dimensjoneres. Hydrogen som benyttes som drivstoff gjennomgår en mekanisk kompresjon for å skape ønsket trykk.

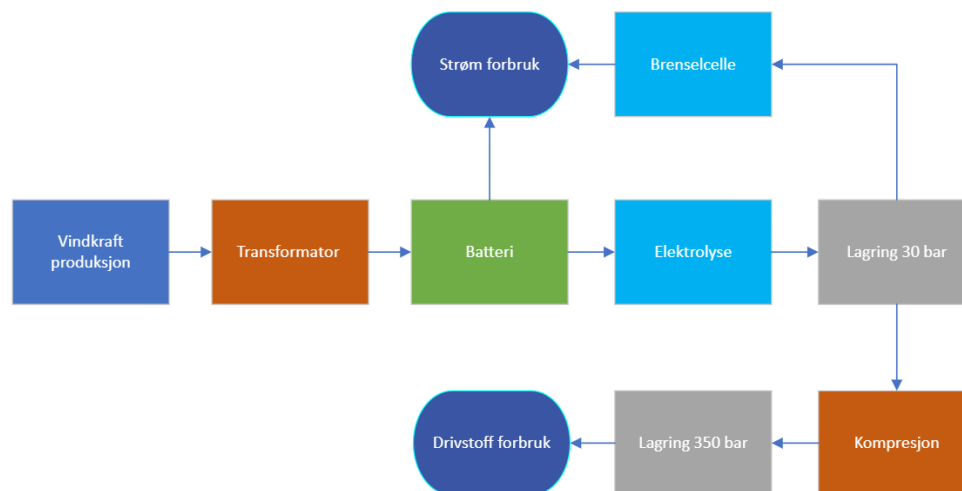
Ved ferdig dimensjonering av anlegg sammenlignes produksjon med kostnader. LCOH beregnes basert på hydrogenproduksjon, drift- og vedlikeholdskostnader, kapitalkostnader, kostnad komponenter og avviklingskostnader. Energikostnaden beregnes basert på totale kostnader dividert på totalt produsert energi ut av systemet.

3.1 Caser

Case 1 baserer seg på vindkraft som fornybar energikilde. Case 2 baserer seg på sol- og vindkraft som fornybar energikilde. Case 3 baserer seg på solkraft som fornybar energikilde. Videre produksjon baserer seg på identiske prosesser.

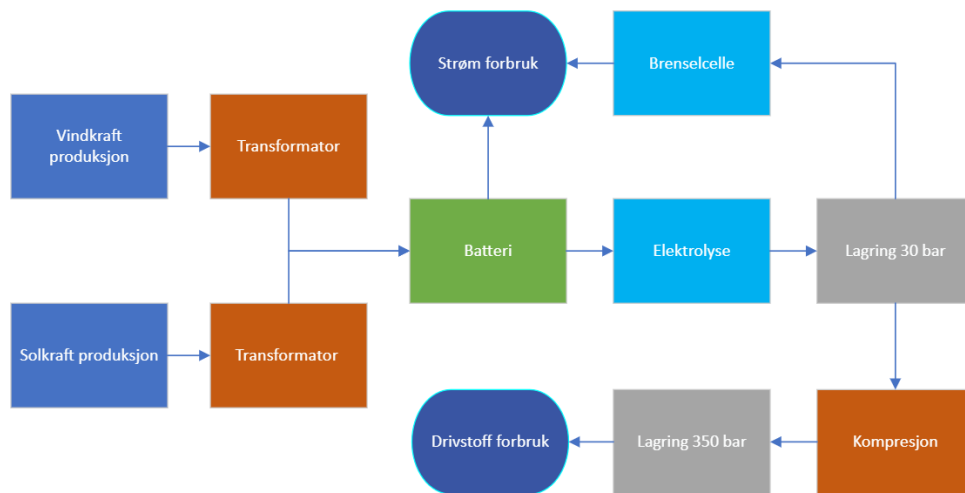
Det antas tap i transformasjonen, samt overføring til batteri og kabelforbindelse mellom anlegg og gårdsbruk. Det antas en gjennomsnittlig verdi for tap av energi ved lagring i batteriet. Videre beregnes tap i elektrolyser ved produsentens oppgitte data. Tap i lagring av hydrogen vil være så lavt at det neglisjeres. Tap av energi i brenselcellen vil beregnes ut ifra produsentens oppgitte data. Kompresjonen av hydrogen fra 30 bar til 350 bar medfører tap på rundt 10%. Til slutt vil total energi- og hydrogenproduksjon beregnes med basis i total kostnad, slik at kostnadsbilde til anleggene fremkommer. Figur 16, Figur 17 og Figur 18 viser produksjonsmetoden i de tre casene.

3.1.1 Case 1



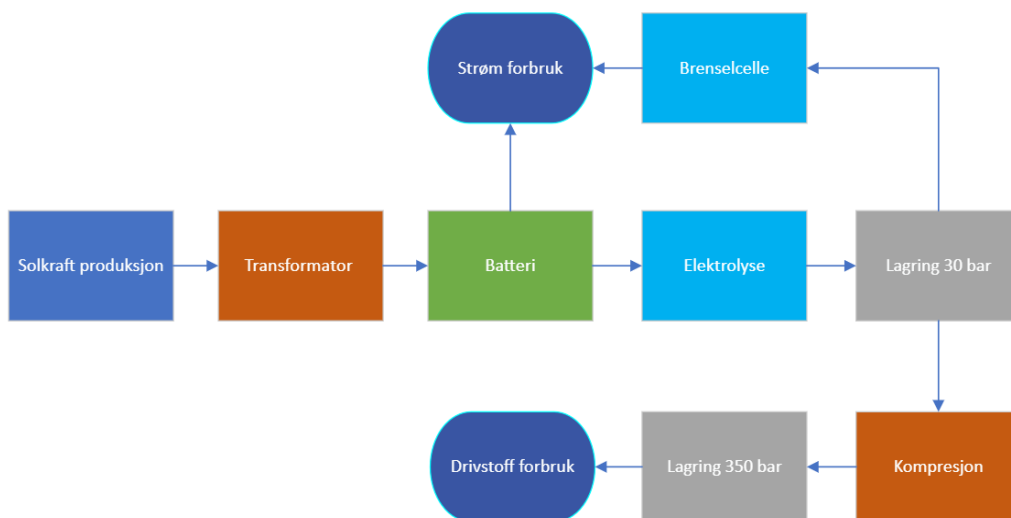
Figur 16 viser produksjonsmetoden til case 1.

3.1.2 Case 2



Figur 17 viser produksjonsmetoden til case 2.

3.1.3 Case 3



Figur 18 viser produksjonsmetoden til case 3.

3.2 Produksjonsprofil vind- og solkraft

3.2.2 Vindkraft

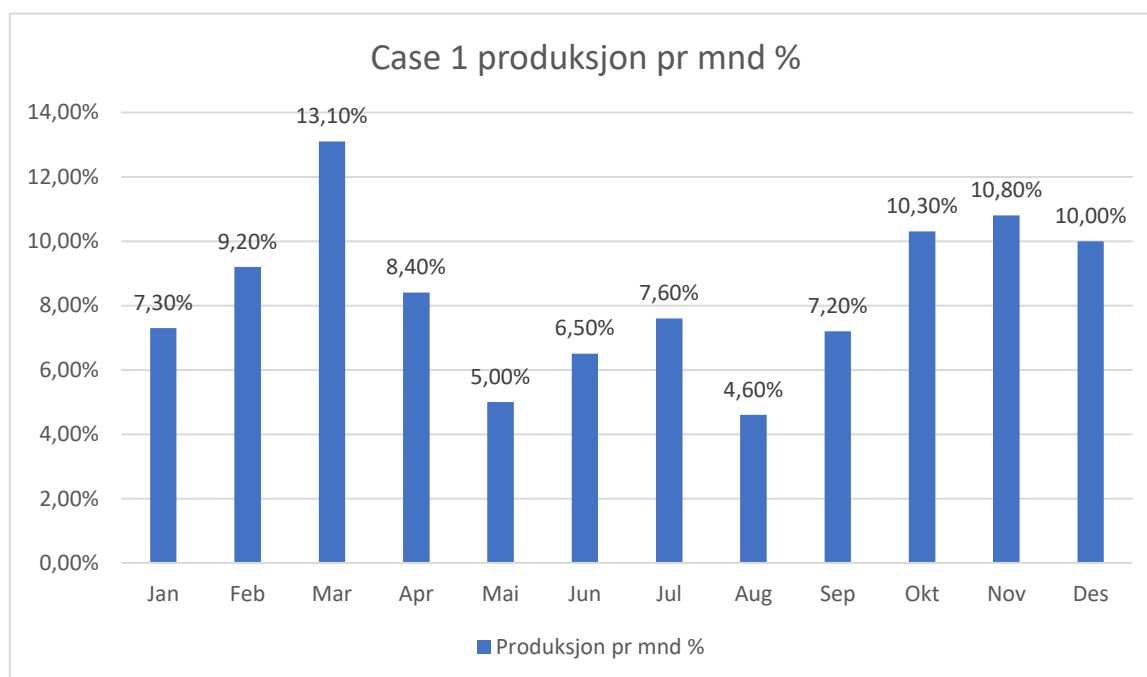
Beregning av vindkraft tar utgangspunkt i kjente data om kapasitetsfaktor. Årsproduksjon baserer seg på data over vindmølleparker, slik at produktet mellom kapasitetsfaktor, installert effekt og timer pr år vil gi årlig produksjon av energi. Siden casene tar utgangspunkt i enkeltstående vindmøller, vil ikke vaketapsfaktor bli medregnet.

Case 1 på Hitra i Trøndelag og case 2 på Innherred i Trøndelag vil basere seg på en 225 kW Vestas V27 turbin. Den tekniske dataen er vist i Tabell 2.

Tabell 2 viser teknisk data for Vestas V27 turbin [20].

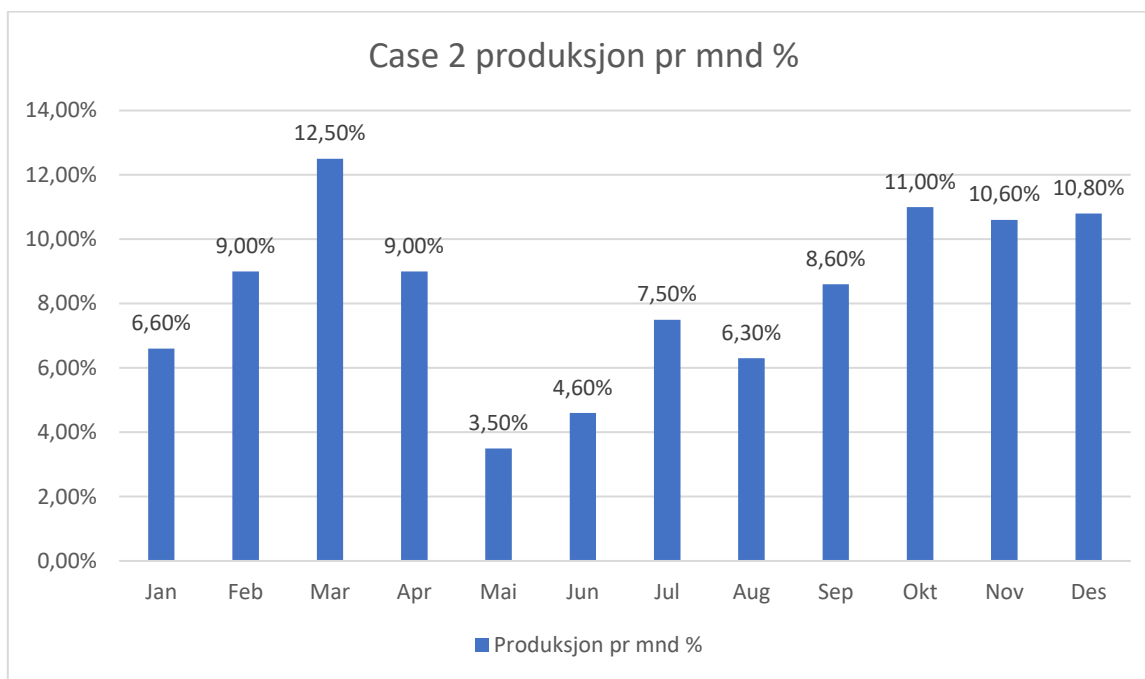
Rotor		Generator		Driftsdata	
Diameter:	27.0 m	Nominell effekt:	225 kWh	Cut-in vindhastighet:	3m/s
Dekt areal:	573.0 m ²	Spenning:	400 V	Cut-out vindhastighet:	25 m/s
Kraft tetthet:	392.7 W/m ²			Ratet vindhastighet:	14 m/s

Produksjonsdata til kraftverk Hitra 2 hentet fra NVE som viser prosentvis fordeling av energiproduksjon per måned. Figur 19 representerer energiproduksjonen til case 1 Hitra Trøndelag.



Figur 19 viser prosentvis fordeling av energiproduksjon per måned fra vindkraftverket Hitra 2 [21]

Produksjonsdata til kraftverk Geitfjellet hentet fra NVE som viser prosentvis fordeling av energiproduksjon per måned. Figur 20 representerer energiproduksjonen til case 2 Innherred Trøndelag.



Figur 20 viser prosentvis fordeling av energiproduksjon per måned fra vindkraftverket Geitfjellet [21]

3.2.2 Solkraft

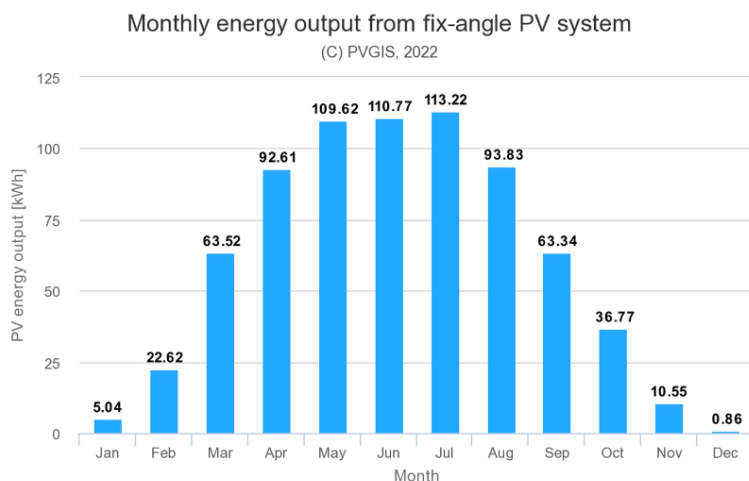
Beregning av solkraft tar utgangspunkt i årlig PV-verdier for gjeldende plassering på solcelleanlegg. Årsproduksjon baserer seg på PV-verdier, areal og nominell virkningsgrad på solcellepanelene.

Casene på Toten i Innlandet og Innherred i Trøndelag vil basere seg på REC Twinpeak 2 solceller, det er en multikrystallinsk solcelle. Installert effekt i case 1 er på 358 kW, og i case 2 på 573 kW. I beregning tas det utgangspunkt i et tapsledd på 2% fra transformator. Den tekniske dataen er vist i Tabell 3.

Tabell 3 viser teknisk data for solcellepanelet REC TP2 multikrystallinsk [22].

<i>Celle type</i>	<i>Kraft [Wp]</i>	<i>Virkningsgrad [%]</i>	<i>Transformator</i>
REC TP2 multikrystallinsk	295	17.7	SolarEdge P600

Figur 22 viser data for solforhold i Innherred Trøndelag. I beregningen har det blitt tatt utgangspunkt i bruk av Crystalline silicon som PV teknologi, 10 % system tap, vinkel på solceller 35°, vinkel mot vest for retning sør på 30°. Figur 21 viser månedlig PV energi produksjon.



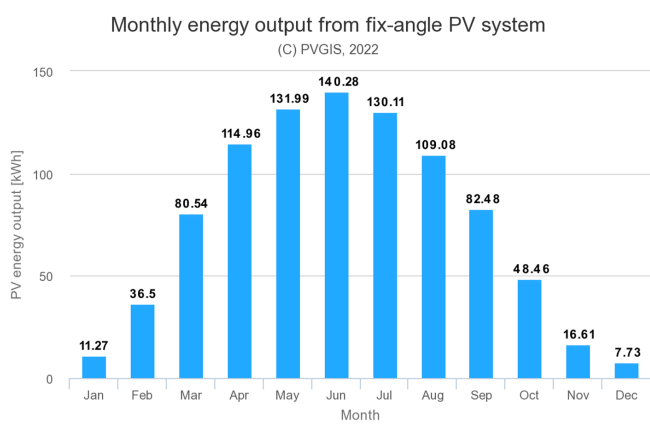
Figur 21 viser energiinnstråling fra solen per måned i case 2 [23]

Provided inputs:	
Location [Lat/Lon]:	63.748,11.324
Horizon:	Calculated
Database used:	PVGIS-SARAH2
PV technology:	Crystalline silicon
PV installed [kWp]:	1
System loss [%]:	10

Simulation outputs:	
Slope angle [°]:	35
Azimuth angle [°]:	30
Yearly PV energy production [kWh]:	722.74
Yearly in-plane irradiation [kWh/m²]:	875.12
Year-to-year variability [kWh]:	43.28
Changes in output due to:	
Angle of incidence [%]:	-3.4
Spectral effects [%]:	NaN
Temperature and low irradiance [%]:	-5
Total loss [%]:	-17.41

Figur 22 viser data over solforhold, systemtap, systemparametere og årlig energiproduksjon [23]

Figur 23 viser data for solforhold på Toten i Innlandet. I beregningen har det blitt tatt utgangspunkt i bruk av Crystalline silicon som PV teknologi, 10 % system tap, vinkel solceller på 30°, vinkel mot øst for retning sør på 15°. Figur 24 viser månedlig PV energi produksjon.



Figur 24 viser energiinnstråling fra solen per måned i case 3 [23].

Provided inputs:	
Location [Lat/Lon]:	60.715,10.839
Horizon:	Calculated
Database used:	PVGIS-SARAH2
PV technology:	Crystalline silicon
PV installed [kWp]:	1
System loss [%]:	10

Simulation outputs:	
Slope angle [°]:	30
Azimuth angle [°]:	-15
Yearly PV energy production [kWh]:	910.01
Yearly in-plane irradiation [kWh/m²]:	1098.15
Year-to-year variability [kWh]:	41.43
Changes in output due to:	
Angle of incidence [%]:	-3.22
Spectral effects [%]:	NaN
Temperature and low irradiance [%]:	-4.86
Total loss [%]:	-17.13

Figur 23 viser data over solforhold, systemtap, systemparametere og årlig energiproduksjon [23].

3.3 Fordeling av produsert energi

Casene skal produsere og distribuere energi til strøm og hydrogen. Fordelingen av energiform er avgjørende for å dekke ønsket energibehov. Casene har et gitt behov for elektrisk energi som strøm, og et gitt behov for energi fra hydrogen som energibærer. Casene baserer seg på sol- og vindkraft som ikke gir en konstant produksjon av energi. For å sikre forsyningssikkerhet er det avgjørende å dimensjonere et anlegg som fordeler energi, slik at energi er tilgjengelig hele året.

3.3.1 Fornybar energikilde

Case 1 på Hitra i Trøndelag baserer seg på vindkraft. Her vil produksjonen variere periodevis, vind kommer uavhengig og produksjon vil derfor variere deretter. Ved høy produksjon er det gunstig å lagre energi som hydrogen, slik at energien kan benyttes ved lav produksjon.

Case 2 på Innherred i Trøndelag baserer seg på sol- og vindkraft, noe som minsker kravet til lagret energi, siden sol- og vindkraft utfyller hverandre. Ved høy produksjon av solkraft, er det ofte lite vind og med høy produksjon av vindkraft er det ofte lite sol. Solkraft vil produsere store deler av årsproduksjonen innen få måneder på sommerhalvåret, mens vindkraft har høyest produksjon av energi på vinterhalvåret.

Case 3 på Toten i Innlandet baserer seg på solkraft. Her vil produksjonene være høy på sommerhalvåret, men lav på vinterhalvåret. Det vil derfor være et stort krav til lagring av energi. På vinterstid er ofte forbruket høyere enn på sommerstid, det er derfor nødvendig med et energilager til supplerings på vinteren.

3.3.2 Årlig energiforbruk

Fordeling av energi baserer seg på følgende data om dieselforbruk og strømforbruk. Se Tabell 4.

Tabell 4 viser årlig dieselforbruk basert på plassering [24].

<i>Plassering</i>	<i>Dieselforbruk pr dekar</i>	<i>Jordbruksareal</i>	<i>Totalt forbruk diesel</i>
<i>Trøndelag</i>	13.7 liter	1000 daa	13 700 liter
<i>Innlandet</i>	14.1 liter	1000 daa	14 100 liter

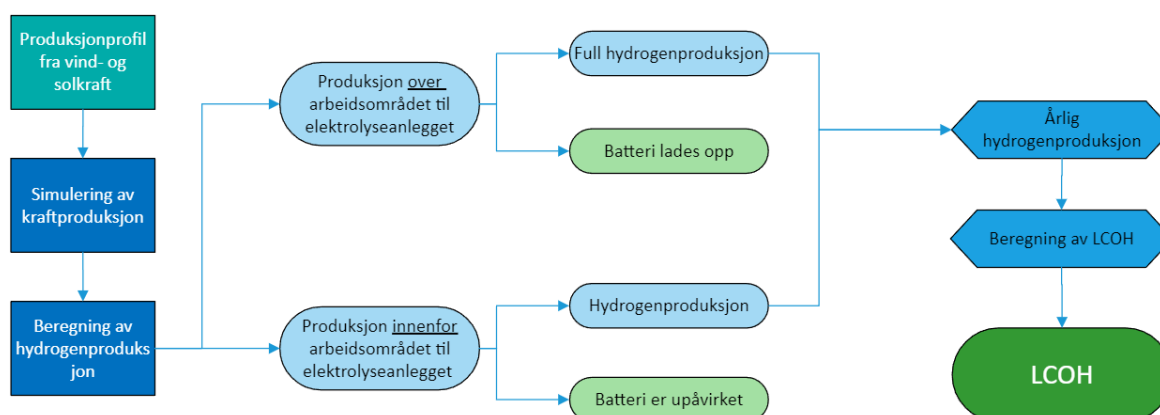
Dieselforbruk beregnes på basis av gjennomsnittsverdier for liter pr dekar jordbruksareal. Verdien for dieselforbruk baserer seg på totalt forbruk av diesel knyttet til gårdsdriften. Presiserer at verdiene er gjennomsnittverdier for gårdsbruk i Trøndelag og Innlandet.

Strømforbruk beregnes på basis av gjennomsnittsverdier for gårdsbruk i Trøndelag og Innlandet. Verdien for strømforbruk fordeler seg over årets 12 måneder, se Figur 26. Det presiseres at verdiene er gjennomsnittverdier for gårdsbruk i Trøndelag og Innlandet. Det tas utgangspunkt i at gjennomsnittlig strømforbruk i Trøndelag og Innlandet er det samme. Det er innhentet data fra 4 gårdsbruk, som representerer et stort mangfold i norsk landbruk angående energiforbruk.

Tabell 5 viser årlig strømforbruk til 4 gårdsbruk [25].

<i>Gårdsbruk</i>	<i>Strømforbruk</i>
<i>Gård 1</i>	310 000 kWh
<i>Gård 2</i>	237 000 kWh
<i>Gård 3</i>	131 000 kWh
<i>Gård 4</i>	90 000 kWh
Gjennomsnittlig strømforbruk	192 000 kWh

3.4 Hydrogenproduksjon



Figur 25 viser produksjonsprofilen til hydrogen.

Figur 25 viser hydrogen sin produksjonsprofil, ved underproduksjon av energi blir batteri ladet opp gjennom bruk av brenselcelle.

3.4.1 Elektrolyse

PEMEL elektrolysører har høy relativ effektivitet, kompakt design, høy strømtetthet og et stort arbeidsområde. PEMEL elektrolysører har et stort potensial til å forbedre effektiviteten, og vil være å foretrekke i fremtiden. AEL elektrolysører har en høy effektivitet og en lavere pris pr produserte kg hydrogen. Siden AEL elektrolysører produseres i storskala, vil slike anlegg operere under for stor effekt. Det tas derfor utgangspunkt i en PEMEL elektrolyser fra NEL som heter C20 [26].

Tabell 6 viser tekniske data for PEMEL- C20 elektrolyser fra NEL.

Tabell 6 viser teknisk data for PEMEL C20 elektrolyser fra NEL [26].

<i>Spesifikasjoner</i>	<i>PEMEL – C20</i>
<i>Klasse</i>	100 kW
<i>Netto produksjonsrate</i>	10 Nm ³ /h
<i>Dynamisk produksjonskapasitet</i>	0 - 100%
<i>Gjennomsnittlig kraftforbruk</i>	6.2 kWh/Nm ³
<i>Renhet</i>	99.9998%
<i>Leveringstrykk</i>	30 bar (435 psig)
<i>Operasjonstemperatur</i>	5-40 °C
<i>Effektivitet</i>	72%

3.5 Fordeling produsert hydrogen

Overskudsenergi vil gå til produksjon av hydrogen. Det er avgjørende at det produseres tilstrekkelig med hydrogen, slik at strømforbruk blir dekt i perioder med underskudsproduksjon, her brukes hydrogen til å produsere energi gjennom brenselcellen. Det er også avgjørende og produserer tilstrekkelig hydrogen til drivstoff, her må tap under

kompresjon tas i betraktning. Hele prosessen følger av tap i energi, det er derfor viktig å lagre energi på flere stadier gjennom batteri, hydrogen 30 bar og hydrogen 350 bar.

Hvilken fornybar energikilde som er benyttet i prosessen, er avgjørende for fordeling av lagret hydrogen.

Case 1: Ved vindkraft som energikilde, vil produksjonen være høy i perioder og lik null i andre perioder. For å forsikre forsyningssikkerhet er det derfor avgjørende med lagring av energi som hydrogen.

Case 2: Ved kombinasjon sol- og vindkraft er det to energiressurser som utfyller hverandre godt. Kravet til lagring av hydrogen som energibærer vil i denne casen bli lavere, mens kravet til produsert hydrogen som drivstoff er identisk med case 1.

Case 3: Ved solkraft som energikilde vil produksjonen være høy i sommermånedene, men lav i vintermånedene. Strømforbruk er også høyere på vinteren noe som fører til stor etterspørsel. Det er avgjørende med mye overproduksjon av energi på sommerstid som lagres som hydrogen, for å dekke energibehovet om vinteren.

Ved overføring fra hydrogen til strøm vil det bli benyttet en FCveloCity – HD100 PEM brenselcelle fra Ballard. Tabell 7 viser tekniske data for brenselcellen.

Tabell 7 viser teknisk data for FCveloCity - HD100 PEM brenselcelle fra Ballard [27].

<i>Spesifikasjoner</i>	<i>Bellard FCveloCity – HD100</i>
<i>Netto kraft</i>	100 kW
<i>Operasjonsspenning</i>	400 – 580 V
<i>Nominell nettostrøm</i>	288 A
<i>Vekt</i>	285 kg
<i>Tilføringstrykk</i>	8 bar
<i>Effektivitet</i>	65%
<i>Drivstoff</i>	Hydrogen

3.6 Kostnader

Kostnaden for casene vil estimeres på bakgrunn av pris på hver enkelt komponent i systemet. Talldata basere seg på flere kilder. Anlegget vil monteres og ferdigstilles innen et år, derfor vil ikke inflasjon beregnes på ulike komponenter. Komponenter montert etter ferdigstilling, samt drift- og vedlikeholdskostnader vil følge en inflasjon på 3,5%. Alle kostnader som påløper under driftsperioden, vil diskonteres til nåverdi med en diskonteringsrente på 8%.

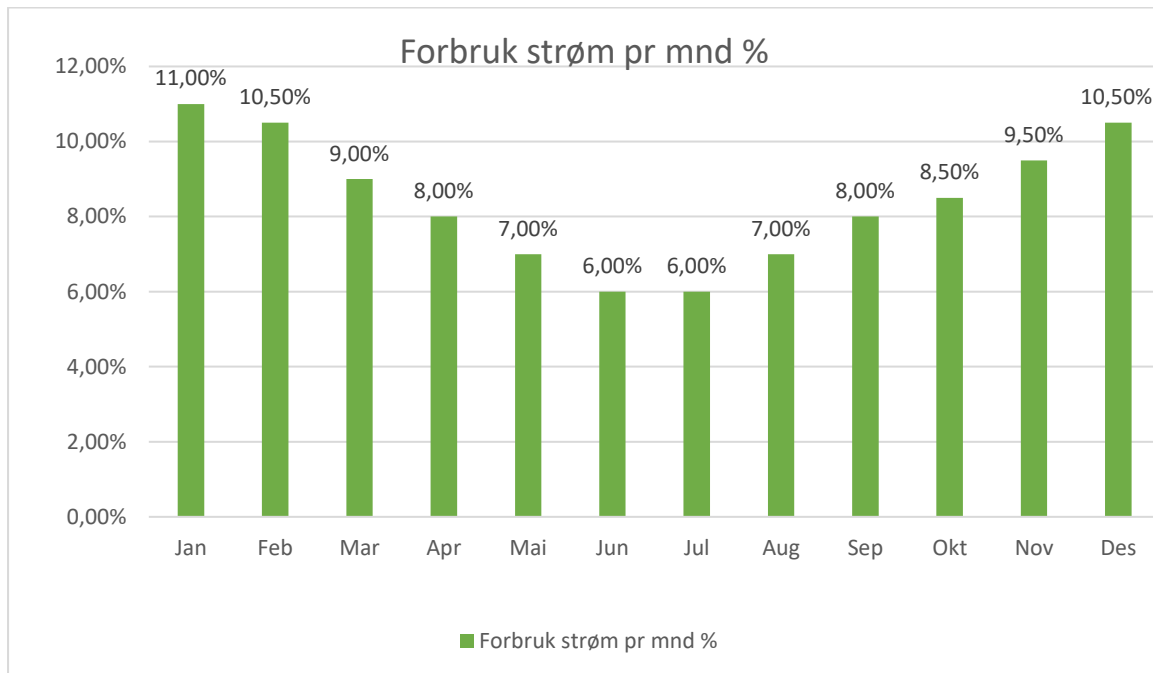
Kostnader for komponenter er listet nedenfor i Tabell 8.

Tabell 8 viser kostnader for komponenter i casene [20] [22] [28] [29].

Komponenter	Pris
Vindturbin Vestas V27 med installasjon	3 000 000 NOK
Solceller REC TP2 multikrystallinsk	1 250 NOK pr panel (1.65 m ²)
Batteri 550 kW	690 000 NOK
Batteri 1000 kW	1 320 000 NOK
PEMEL C20 elektrolyser komplett anlegg	15 000 NOK/kW
PEM Ballard Brenselcelle komplett anlegg	310 000 NOK
Hydrogen tank 30 bar	300 000 NOK
Hydrogen tank 350 bar	2 500 000 NOK
Ferskvannstank	5000 NOK
Mekanisk kompressor	250 000 NOK

3.7 Prosentvis forbruk av strøm

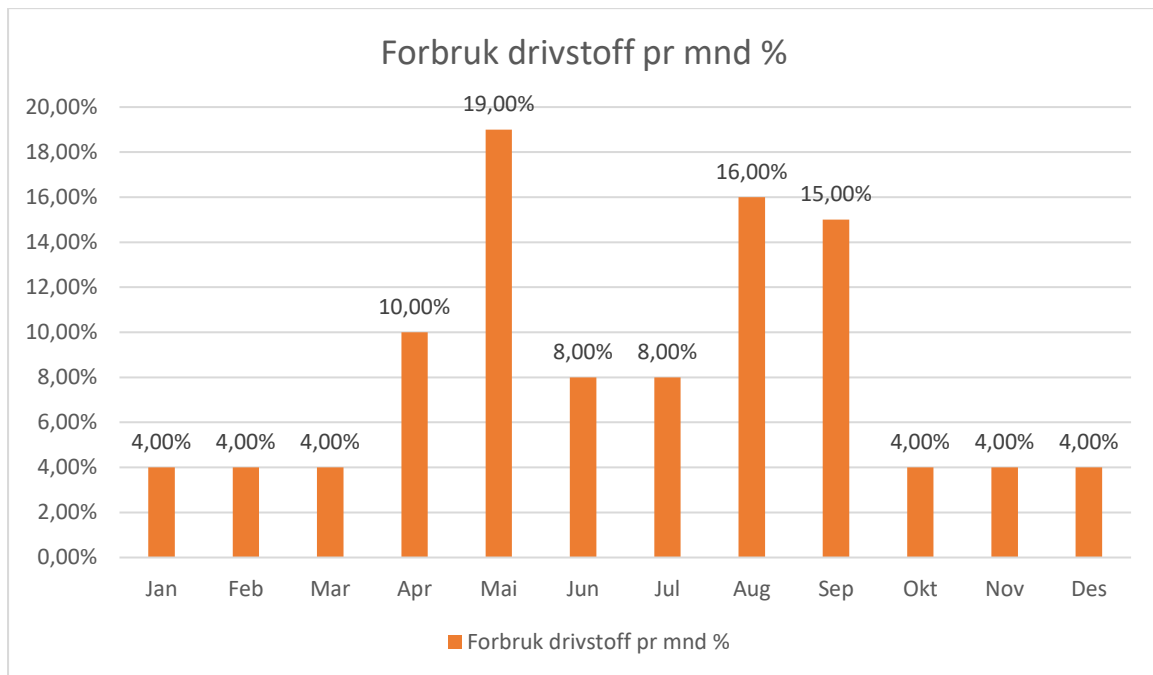
Energibehovet varierer gjennom året, på vinteren er det mer behov for oppvarming, noe som fører til økt strømforbruk. På en gårdsdrift er det prosesser som kontinuerlig forbruker energi, derfor er fordelingen av energibehov mindre varierende på en gårdsdrift, sammenlignet med husstander. Figur 26 er et estimat på forbruk



Figur 26 viser prosentvis forbruk av strøm per måned.

3.8 Prosentvis forbruk drivstoff

Forbruket av drivstoff varierer gjennom året. Under vår- og høstønn øker drivstofforbruket, samt i vekstsesong. Utenom vekstsesongen er drivstofforbruket konstant lavt, siden drivstoff kun bruks til daglig drift. Figur 27 er et estimat på forbruk.



Figur 27 viser prosentvis forbruk av drivstoff per måned.

4 Resultater

I denne delen av oppgaven presenteres resultater fra simulering og beregning. Resultatene sammenlignes med dagens energisituasjon med hensyn på pris pr kWh og pris per kg hydrogen.

4.1 Samlede resultater

Tabell 9 viser samlede resultater.

	Case 1	Case 2	Case 3
LCOH [€/kg]	6,473	10,351	8,152
Energikost [NOK/kWh]	44,83	64,28	56,55
Total kostnad livsløp [Tusen NOK]	19 755	21 148	20 237
Energiproduksjon vindkraft [MWh]	680,00	218,80	-
Energiproduksjon solkraft [MWh]	-	284,20	554,21
Årlig produksjon hydrogen [MWh]	407,22	272,61	331,21
Årlig produksjon hydrogen [kg]	12 229	8 186	9 946
Årlig produksjon brenselcelle [MWh]	79,51	69,81	89,20
Årlig produksjon H₂ drivstoff [MWh]	246,71	140,31	163,91
Årlig produksjon H₂ drivstoff [kg]	7 409	4 214	4 922

4.2 Årlig forbruk strøm og drivstoff

Tabell 10 viser årlig strømforbruk.

Tabell 11 viser årlig dieselforbruk.

<i>Måned</i>	<i>Forbruk strøm</i>	<i>Måned</i>	<i>Forbruk diesel</i> <i>case 1 og 2</i>	<i>Forbruk diesel</i> <i>case 3</i>
<i>Jan</i>	21.12 MWh	<i>Jan</i>	5.54 MWh	5.69 MWh
<i>Feb</i>	20.16 MWh	<i>Feb</i>	5.54 MWh	5.69 MWh
<i>Mar</i>	17.28 MWh	<i>Mar</i>	5.53 MWh	5.70 MWh
<i>Apr</i>	15.36 MWh	<i>Apr</i>	13.84 MWh	14.24 MWh
<i>Mai</i>	13.44 MWh	<i>Mai</i>	26.29 MWh	27.09 MWh
<i>Jun</i>	11.52 MWh	<i>Jun</i>	11.07 MWh	11.39 MWh
<i>Jul</i>	11.52 MWh	<i>Jul</i>	11.07 MWh	11.39 MWh
<i>Aug</i>	13.44 MWh	<i>Aug</i>	22.14 MWh	22.79 MWh
<i>Sep</i>	15.36 MWh	<i>Sep</i>	20.76 MWh	21.36 MWh
<i>Okt</i>	16.32 MWh	<i>Okt</i>	5.54 MWh	5.70 MWh
<i>Nov</i>	18.24 MWh	<i>Nov</i>	5.53 MWh	5.70 MWh
<i>Des</i>	20.16 MWh	<i>Des</i>	5.53 MWh	5.69 MWh
SUM	192.0 MWh	SUM	138.37 MWh	142.41 MWh

Tabell 10 viser forbruk av strøm og tabell 11 viser forbruk av drivstoff fordelt på måneder. Strømforbruket antas som likt ved alle 3 caser. Dieselforbruket er høyere i case 3 sammenlignet med case 1 og 2, grunnet høyere forbruk per dekar på Toten i Innlandet. Energiinnhold fra diesel er beregnet gjennom følgende sammenheng; 1 liter diesel tilsvarer 10,1 kWh.

4.3 Energiproduksjon vindmøller

4.3.1 Årlig produksjon

Årlig produksjon til vindmøllen i case 1 og 2 er avhengig av vindforhold. Siden vindforholdene varierer, vil ikke vindmøllen produsere på maksimal teoretisk effekt hele året. I case 1 er årlig

produksjon beregnes ut ifra kapasitetsfaktor som er hentet fra NVE sine databaser. I case 2 er kapasitetsfaktor beregnet gjennom data fra vindturbin til Rye Wind i Trøndelag. Rye Wind og case 2 har identiske vindforhold ifølge NVE sitt vindressurskart [30]. Fordeling av energiproduksjon gjennom årets 12 måneder kommer av data fra NVE og Rye Wind.

Kapasitetsfaktor til case 1 på Hitra i Trøndelag er 0,354. Kapasitetsfaktoren til case 2 på Innherred i Trøndelag er 0,111.

Tabell 12 viser årlig energiproduksjon fra vindkraft i case 1 og 2.

<i>Caser</i>	<i>Årlig produksjon</i>
<i>1 Hitra Trøndelag</i>	680.0 MWh
<i>2 Innherred Trøndelag</i>	218.8 MWh

4.3.2 Produksjon per måned

Tabell 13 viser energiproduksjon per måned fra vindkraft i case 1 og 2.

<i>Måned</i>	<i>Case 1 Hitra Trøndelag</i>	<i>Case 2 Innherred Trøndelag</i>
<i>Jan</i>	49.64 MWh	14.44 MWh
<i>Feb</i>	62.56 MWh	19.69 MWh
<i>Mar</i>	89.08 MWh	27.35 MWh
<i>Apr</i>	57.12 MWh	19.69 MWh
<i>Mai</i>	34.0 MWh	7.66 MWh
<i>Jun</i>	44.20 MWh	10.06 MWh
<i>Jul</i>	51.68 MWh	16.41 MWh
<i>Aug</i>	31.28 MWh	13.78 MWh
<i>Sep</i>	48.96 MWh	18.82 MWh
<i>Okt</i>	70.04 MWh	24.07 MWh
<i>Nov</i>	73.44 MWh	23.19 MWh
<i>Des</i>	68.0 MWh	23.63 MWh

4.4 Energiproduksjon solceller

4.4.1 Årlig produksjon

Årlig produksjon til solcellene i case 2 og 3 er avhengig av solforhold. Solinnstråling vil variere ut ifra årstid og solforhold, derfor vil ikke solcellene produsere på maksimal teoretisk effekt hele året. Solcelleproduksjon er beregnet ut ifra solstråling, vinkel på panel, breddegrad - retning og virkningsgrad. Det er tatt hensyn til år til år variasjoner. Fordeling av energiproduksjon gjennom årets 12 måneder kommer av data fra PVGIS. Tabell 14 viser årlig produksjon fra solkraft i case 2 og 3 [23].

Tabell 14 viser årlig energiproduksjon fra solkraft i case 2 og 3.

<i>Caser</i>	<i>Årlig produksjon</i>	<i>Areal</i>
2 Innherred Trøndelag	284.2 MWh	2 500 m ²
3 Toten Innlandet	554.2 MWh	4 000 m ²

4.4.2 Produksjon per måned

Tabell 15 viser energiproduksjon per måned fra solkraft i case 2 og 3.

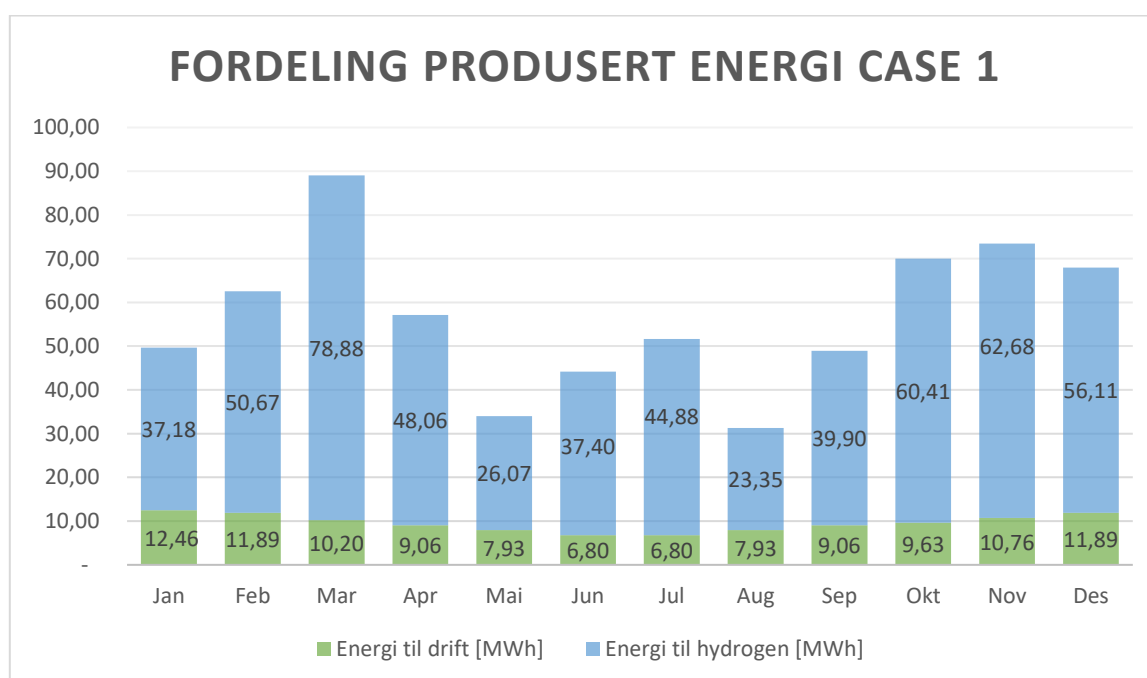
<i>Måned</i>	<i>Case 2 Innherred Trøndelag</i>	<i>Case 3 Toten Innlandet</i>
<i>Jan</i>	1.99 MWh	6.65 MWh
<i>Feb</i>	8.81 MWh	22.17 MWh
<i>Mar</i>	25.01 MWh	48.77 MWh
<i>Apr</i>	36.38 MWh	69.83 MWh
<i>Mai</i>	43.20 MWh	80.36 MWh
<i>Jun</i>	43.48 MWh	85.35 MWh
<i>Jul</i>	44.34 MWh	80.36 MWh
<i>Aug</i>	36.95 MWh	66.50 MWh
<i>Sep</i>	25.01 MWh	49.88 MWh
<i>Okt</i>	14.49 MWh	29.37 MWh
<i>Nov</i>	4.26 MWh	9.97 MWh
<i>Des</i>	0.28 MWh	4.99 MWh

4.5 Fordeling produsert energi

Energien fordeles etter produksjon, slik at driften har tilgang på energi til enhver tid. Fordelingen varierer for hver av de tre casene, og beregnes fra forventet prosentfordeling av energi hver måned. Batteriet vil operere med lagring av 20-80% av full kapasitet. Ved fullt batteri (80%) benyttes energien til å produsere hydrogen som energibærer. Ved tomt batteri (20%) benyttes lagret hydrogen til å produsere energi gjennom brenselcellen.

Case 1:

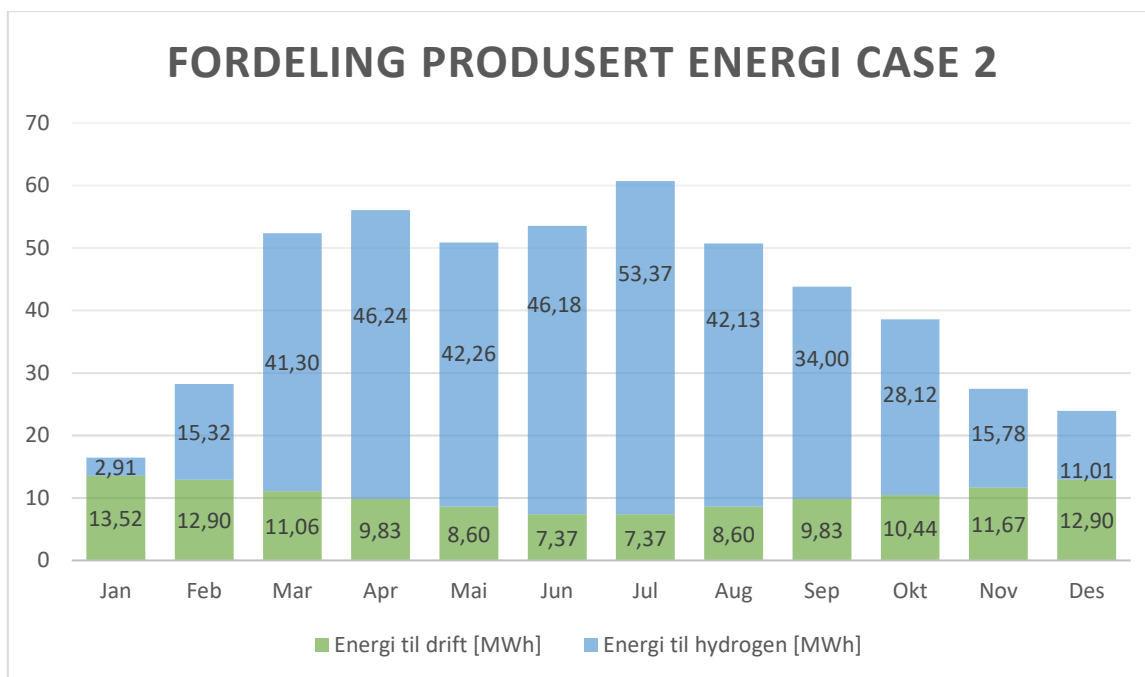
Vindturbinene på Hitra i Trøndelag har etter data fra NVE en brukstid på 3101 timer, som tilsvarer kapasitetsfaktor på 35.4 %. Resterende 5904 timer i året, vil anlegget forsyne driften med energi fra batterilagring og hydrogenlagring. 41 % av strømforbruket kommer fra hydrogen. Fordelingen av energi er gitt i Figur 28.



Figur 28 viser fordeling produsert energi i case 1.

Case 2:

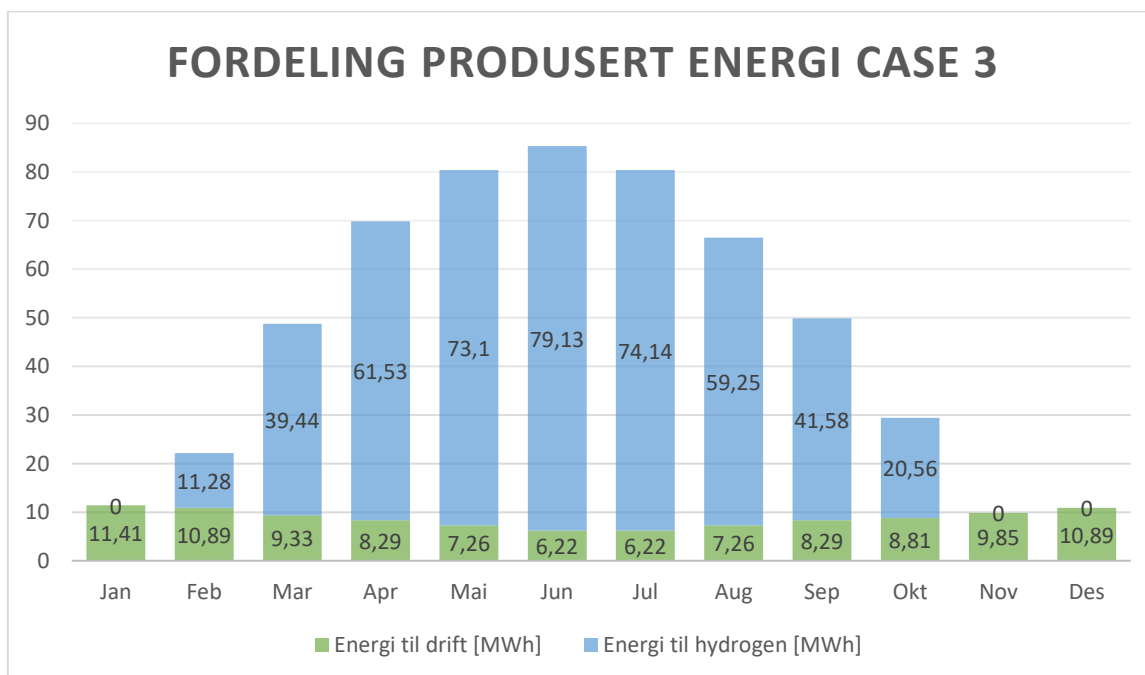
Vindturbinene i Innherred i Trøndelag har etter data fra Rye-vind en brukstid på 972 timer, som tilsvarer en kapasitetsfaktor på 11.1 %, solcellene har kapasitetsfaktor på 10.65 %. 36% av strømforbruk kommer fra hydrogen. Fordelingen av energi er gitt i Figur 29.



Figur 29 viser fordeling produsert energi i case 2.

Case 3:

Solcellene på Toten i Innlandet har etter data fra PVGIS en kapasitetsfaktor på 11,3%. 46% av strømforbruket kommer fra hydrogen. Fordelingen av energi er gitt i Figur 30.

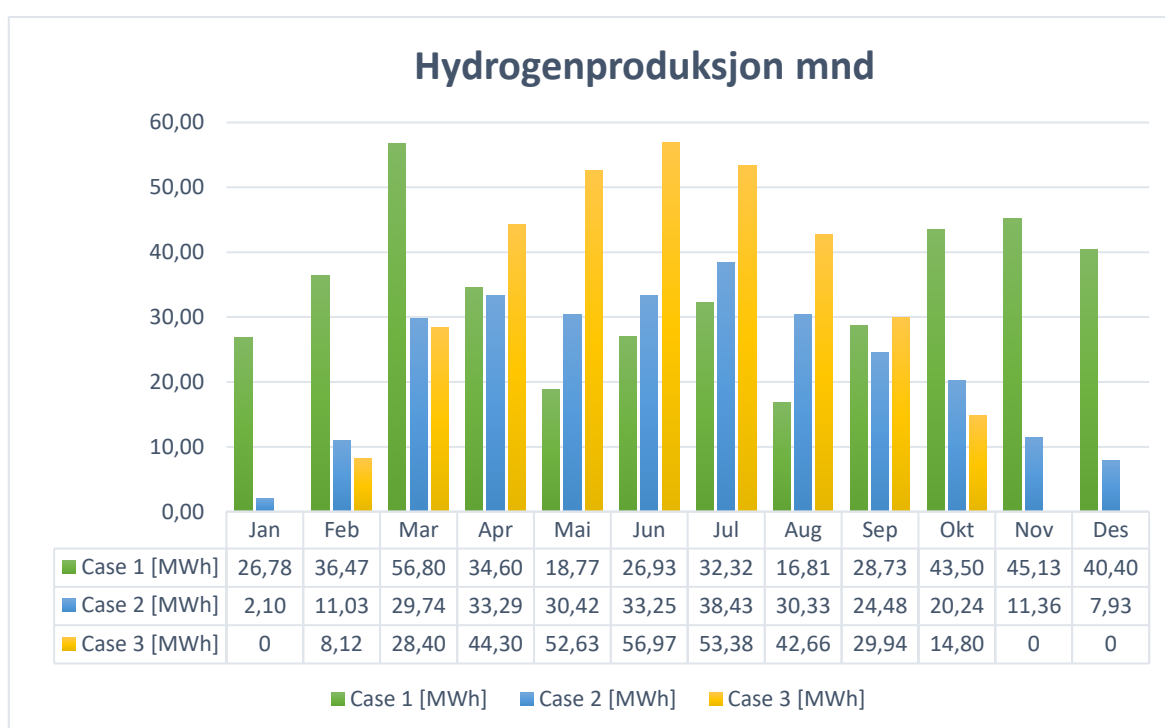


Figur 30 viser fordeling produsert energi i case 3.

4.6 Hydrogenproduksjon

Hydrogenproduksjon beregnes med bakgrunn på energi tilgjengelig for produksjon og effektivitet. Beregninger tar utgangspunkt i nominell effektivitet på 72%. Anleggene bruker batteri som forsyner elektrolyseren slik at optimal drift opprettholdes. Det tas hensyn til tap i overføring og gjennom elektrolysen. Figur 31 viser fordeling av hydrogenproduksjon.

4.6.1 Produksjon hydrogen per måned



Figur 31 viser hydrogenproduksjon per måned.

4.6.2 Årlig produksjon hydrogen

Tabell 16 viser årlig produksjon av hydrogen.

Caser	Årsproduksjon hydrogen [MWh]	Årsproduksjon hydrogen [kg]
<i>1 Hitra Trøndelag</i>	407.22 MWh	12 229 kg
<i>2 Innherred Trøndelag</i>	272.61 MWh	8 186 kg
<i>3 Toten Innlandet</i>	331.21 MWh	9 946 kg

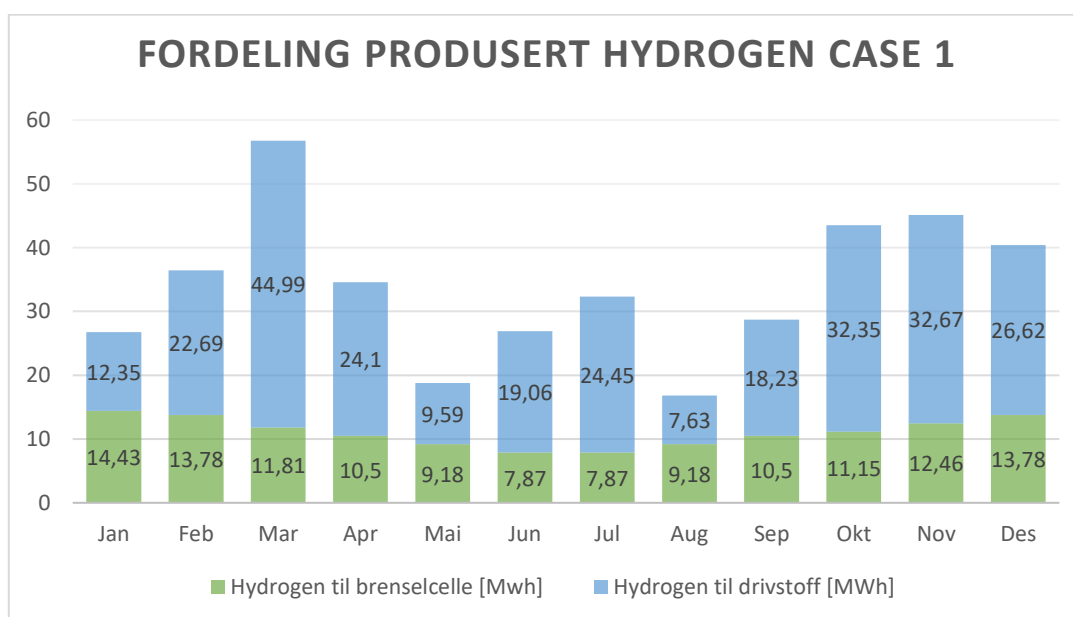
4.7 Fordeling produsert hydrogen

Produsert hydrogen fordeles til brenselcellen for å forsyne driften slik at strømbehovet blir dekket, videre vil resterende hydrogen komprimeres til 350 bar og brukes som drivstoff.

Strømbehovet beregnes ut ifra tilgjengelig hydrogen etter tap elektrolyse, og videre tap i brenselcelle. Strømbehovet som må dekkes beregnes ut ifra fordelingsfaktor og strømbehov i de ulike casene. Til slutt beregnes tilgjengelig hydrogen til drivstoff. Tap som følge av kompresjon er medregnet i data som kommer frem i resultater. Figur 32, Figur 33 og Figur 34 viser fordeling av hydrogen til brenselcelle og drivstoff.

Case 1:

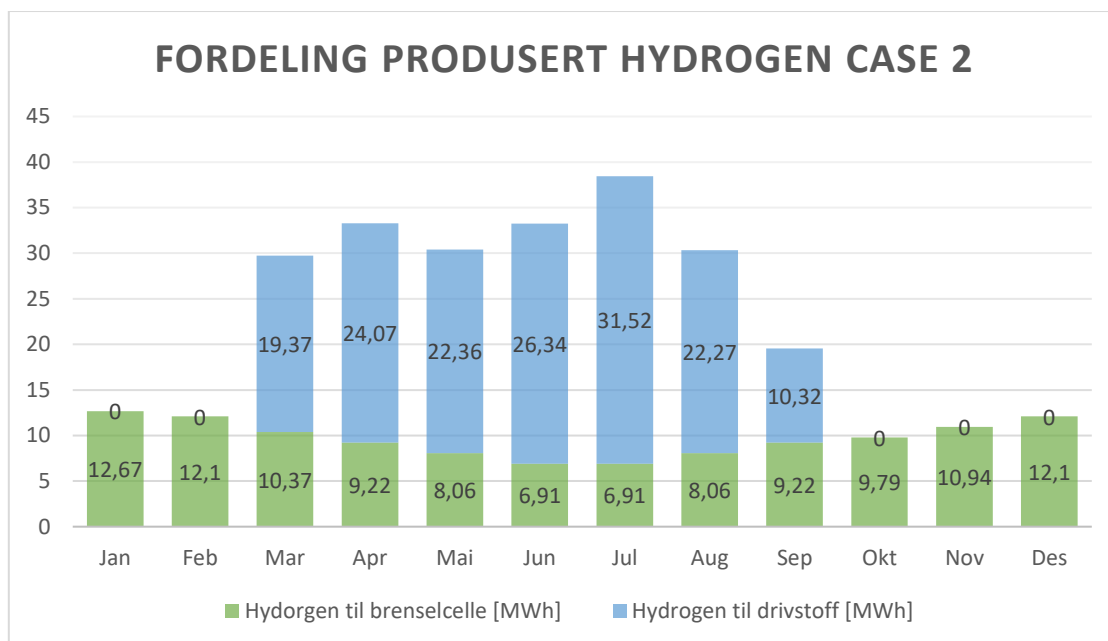
41% av strømforbruket i case 1 kommer fra energi lagret som hydrogen. Videre er tap i transformator, brenselcelle og overføring på 40%. Prosessen har dermed teoretisk effekt på 60%.



Figur 32 viser fordeling av produsert hydrogen i case 1.

Case 2:

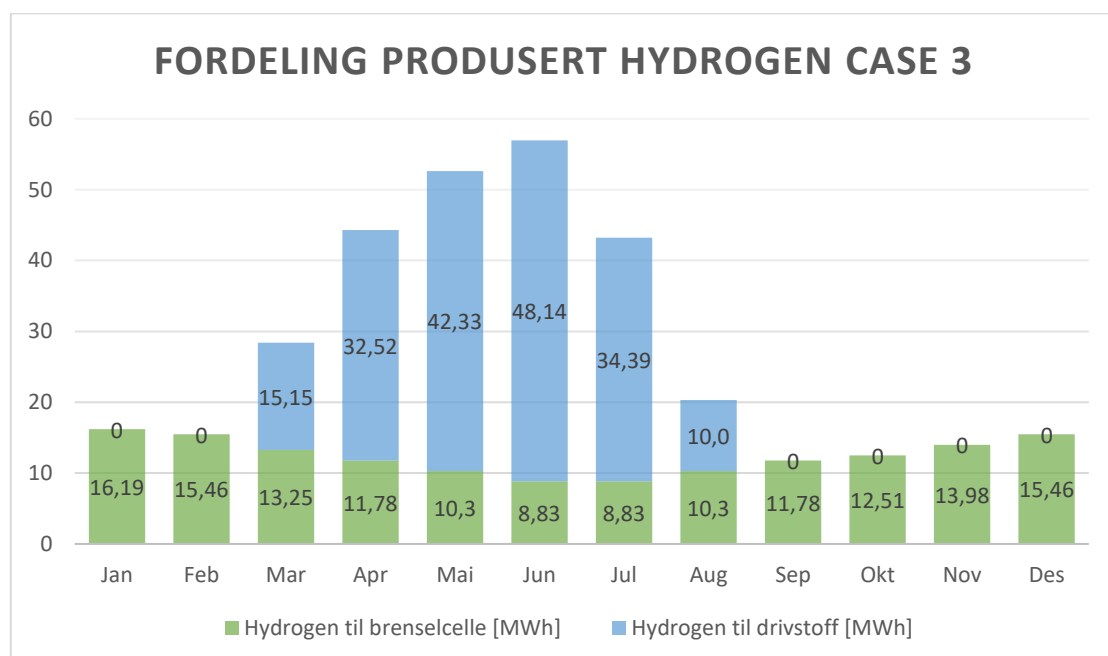
36% av strømforbruket i case 2 kommer fra energi lagret som hydrogen. Videre er tap i transformator, brenselcelle og overføring på 40%. Prosessen har derfor teoretisk effekt på 60%.



Figur 33 viser fordeling av produsert hydrogen i case 2.

Case 3:

46% av strømforbruket i case 1 kommer fra energi lagret som hydrogen. Videre er tap i transformator, brenselcelle og overføring på 40%. Prosessen har derfor teoretisk effekt på 60%.



Figur 34 viser fordeling av produsert hydrogen i case 3.

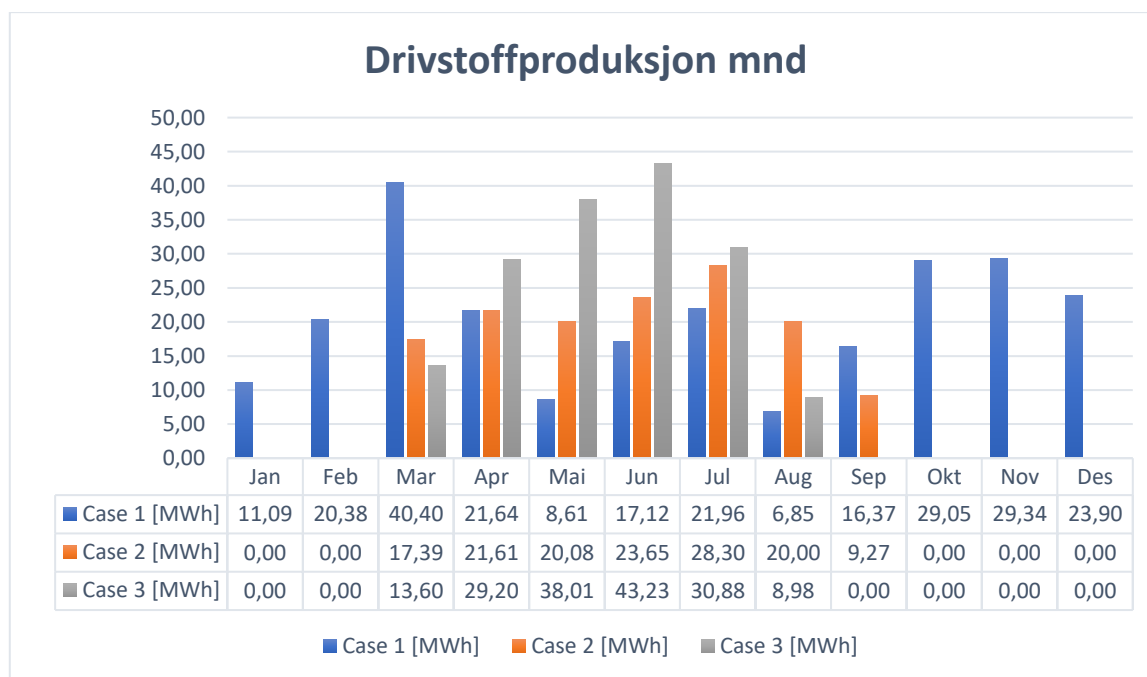
4.7.1 Årlig produksjon brenselcelle

Tabell 17 viser årlig produksjon til brenselcelle.

<i>Caser</i>	<i>Årsproduksjon</i>
1 Hitra Trøndelag	79.51 MWh
2 Innherred Trøndelag	69.81 MWh
3 Toten Innlandet	89.20 MWh

4.7.2 Årsproduksjon drivstoff hydrogen 350 bar

Hydrogen tilgjengelig etter strømbehovet er dekket, komprimeres og benyttes som drivstoff. Hydrogenet gjennomgår en kompresjon fra 30 bar til 350 bar, med et tap på 10.2%, se Figur 12. Figur 35 viser årlig produksjon av hydrogen som drivstoff. Tabell 18 viser årlig drivstoffproduksjon.



Figur 35 viser drivstoffproduksjon per måned.

Tabell 18 viser årlig drivstoffproduksjon.

<i>Caser</i>	<i>Årsproduksjon [MWh]</i>	<i>Årsproduksjon [kg]</i>
<i>1 Hitra Trøndelag</i>	246.71 MWh	7 409 kg
<i>2 Innherred Trøndelag</i>	140.31 MWh	4 214 kg
<i>3 Toten Innlandet</i>	163.91 MWh	4 922 kg

4.8 Utnyttet energi i hydrogenmotor og dieselmotor

Energibehovet til drivstoffproduksjon er avhengig av effektiviteten til hydrogenkjøretøy sammenlignet med dieselmotorer. Rapporten tar utgangspunkt i en virkningsgrad på 38% til dieselmotoren, på grunn av variasjon i alder og følgende teknologi. Brenselcellen i traktoren har en effektivitet på 60%, mens elmotoren har en effektivitet på 90%. Noe som tilsvarer en total virkningsgrad på 54%.

4.8.1 Årlig energibehov til drivstoff

Tabell 19 viser årlig energibehov til drivstoff.

<i>Caser</i>	<i>Årlig energibehov [MWh]</i>	<i>Årlig energibehov [kg]</i>
<i>1 Hitra Trøndelag</i>	97.37	2 924
<i>2 Innherred Trøndelag</i>	97.37	2 924
<i>3 Toten Innlandet</i>	100.2	3 009

På bakgrunn av variasjoner av fornybare energiressurser er årlig energiproduksjon til drivstoff høyere enn energibehovet. I case 1 er årlig energiproduksjon vesentlig høyere enn energibehovet til drivstoff, noe som resulterer i overskudd av hydrogen, som kan distribueres til andre kjøretøy.

4.9 Kostnader

Levetiden til komponenter i systemet variere. Vindmølle, solcellene, transformatorene, ferskvannstank, lagringstank og øvrige systemer har en levetid på 25 år. Kompressoren har en levetid på 12,5 år, mens elektrolysøren har en levetid på 10 år. Brenselcellen og batteri har en levetid på 8 år. Kostnader er beregnet på bakgrunn av dette, samt drift og vedlikeholdskostnader. Tabell 20 gir en totaloversikt over kostnader.

Tabell 20 viser kostnadene til casene gjennom livsløpet [31] [32] [33] [34] [35].

Fase	Kostnad komponenter	Case 1	Case 2	Case 3	Enhet
Prosjektering og utvikling		150	180	150	Tusen NOK
Produksjon og anskaffelser	<i>Vindturbin m tårn</i>	1 100	1 100	-	Tusen NOK
	<i>Fundament</i>	200	200	-	Tusen NOK
	<i>Transformator</i>	30	30	-	Tusen NOK
	<i>Forankring og øvrig</i>	300	300	-	Tusen NOK
	<i>Solceller m forankring</i>	-	2 200	3 500	Tusen NOK
	<i>Fundament</i>	-	150	200	Tusen NOK
	<i>Transformator</i>	-	30	30	Tusen NOK
	<i>Batteri</i>	1 320	690	690	Tusen NOK
	<i>Ferskvannntank</i>	5	5	5	Tusen NOK
	<i>Elektrolysør</i>	1 300	1 300	1 300	Tusen NOK
	<i>Brenselcelle</i>	310	310	310	Tusen NOK
	<i>Kompressor</i>	250	250	250	Tusen NOK
	<i>Tank 30 bar 100 kg</i>	300	300	300	Tusen NOK
	<i>Tank 350 bar 1 500 kg</i>	2 500	2 500	2 500	Tusen NOK
Installasjon	<i>Turbin og fundament</i>	1 000	1 000	-	Tusen NOK
	<i>Kabler og transformator</i>	50	50	-	Tusen NOK
	<i>Solceller og fundament</i>	-	1 350	2 150	Tusen NOK
	<i>Kabler og transformator</i>	-	40	40	Tusen NOK
	<i>Batteri</i>	40	30	30	Tusen NOK
	<i>Reinstallasjon batteri</i>	12	10	10	Tusen NOK

	<i>Ferskvannstank</i>	10	10	10	Tusen NOK
	<i>Elektrolysør</i>	50	50	50	Tusen NOK
	<i>Reinstallasjon elektrolysør</i>	30	30	30	Tusen NOK
	<i>Brenselcelle</i>	40	40	40	Tusen NOK
	<i>Reinstallasjon brenselcelle</i>	20	20	20	Tusen NOK
	<i>Kompressor</i>	20	20	20	Tusen NOK
	<i>Reinstallasjon kompresjor</i>	5	5	5	Tusen NOK
	<i>Øvrige styringssystemer</i>	100	100	100	Tusen NOK
	<i>Tanker 30/350 bar</i>	30	30	30	Tusen NOK
Drift og vedlikehold	<i>Vindmølle</i>	5	5	-	Tusen NOK/år
	<i>Solceller</i>	-	4	4	Tusen NOK/år
	<i>Batteri</i>	1	1	1	Tusen NOK/år
	<i>Elektrolysør</i>	2	2	2	Tusen NOK/år
	<i>Brenselcelle</i>	2	2	2	Tusen NOK/år
	<i>Kompressor</i>	1	1	1	Tusen NOK/år
	<i>Tanker 30/250 bar</i>	0,5	0,5	0,5	Tusen NOK/år
	<i>Øvrige styringssystemer</i>	5	5	5	Tusen NOK/år
Avvikling		100	120	100	Tusen NOK
Totalt uten drift og vedlikehold engangskost		9 105	12 265	11 555	Tusen NOK
Totalt uten drift og vedlikehold etter 25 år		19 090	20 322	19 612	Tusen NOK
Totalt med drift og vedlikehold Etter 25 år		19 755	21 148	20 237	Tusen NOK

4.10 LCOH

Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) er beregnet på bakgrunn av kapitalutgifter, driftskostnader, avviklingskostnader, kapitalkostnad og produsert hydrogen. Tabell 21 viser kostnader per kg produserte hydrogen.

Tabell 21 viser resulterende LCOH.

Caser	LCOH [kr/kg]	LCOH [€/kg]
1 Hitra Trøndelag	64,73	6,473
2 Innherred Trøndelag	103,51	10,351
3 Toten Innlandet	81,52	8,152

4.11 Kostnad per kWh

Kostnad per produserte kWh er beregnet gjennom å dividere totale kostnader på summen av energi ut av anlegget. Tabell 22 viser kostnader per kWh

Tabell 22 viser resulterende kostnad per kWh utnyttet energi.

Caser	Energikost [NOK/kWh]	Energikost [Euro/kWh]
1 Hitra Trøndelag	44,83	4,483
2 Innherred Trøndelag	63,28	6,328
3 Toten Innlandet	56,55	5,655

5 Diskusjon

I denne delen av oppgaven blir hovedresultater oppsummert og diskutert. De tre casene blir diskutert enkeltvis, og videre diskuteres lønnsomhet, bærekraft og usikkerhet.

Oppgaven har som hensikt å svare på potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk. Tap i overføring og kostnad ved slike enkeltstående anlegg vil være avgjørende for at prosjektet skal være realistisk å gjennomføre. Fra resultater er det tydelig at kostnad på produsert hydrogen og energi varierer ut ifra hvilke fornybare energiresurser som er benyttet og plassering på anlegg.

5.1 Caser

5.1.1 Case 1

Case 1 på Hitra i Trøndelag består av en vindmølle til energiproduksjon, og har de laveste produksjonskostnadene per energienhet og hydrogenenhet. Dette er fordi turbinen har høy kapasitetsfaktor, noe som fører til høy produksjon av energi. Høy produksjon medfører større krav til batterikapasitet til korttidslagring, som igjen fører til større kostnader på batteri. Med vindkraft vil det bli flere lengre perioder uten energiproduksjon der energibehovet ikke dekkes, dette styrker problemstillingen om å lagre energi som hydrogen, slik at energibehov blir dekt til enhver tid. Med en hydrogenkostnad på 64,73 kr per kg, vil et slik anlegg være konkurransedyktig med dagens hydrogenpriser på 90 kr per kg [40]. Energikostnaden er høy i forhold til dagens energipriser beskrevet i kapittel 4.11, derfor vil ikke energiproduksjon til strøm være konkurransedyktig med dagens priser.

5.1.2 Case 2

Case 2 på Innherred i Trøndelag består av en vindmølle og 2 500 m² med solceller, og har de høyeste produksjonskostnadene per energienhet og hydrogenenhet. Dette er fordi turbinene har lav kapasitetsfaktor og solcelleanlegget har høy investeringskostnad sammenlignet med vindturbinen. Produksjonen er lav sammenlignet med kostnader per produserte enhet. Energiproduksjonen til anlegget vil utfylle hverandre godt, slik at det er mindre behov for produksjon av hydrogen som energibærer, noe som igjen fører til mindre tap av energi. Med en hydrogenkostnad på 103,51 kr per kg er ikke et slik anlegg konkurransedyktig med dagens

hydrogenpriser på 90 kr per kg [40]. Energikostnaden som er beskrevet i kapittel 4.11 er høy sammenlignet med dagens energipriser.

5.1.3 Case 3

Case 3 på Toten i Innlandet består av 4000 m² med solceller, og har de nest lavest produksjonskostnader per energienhet og hydrogenenhet. Dette er fordi Toten har høyere solinnstråling enn Trøndelag, og at anlegget kun består av solceller. Energiproduksjonen er høy på sommerstid og lav på vinterstid, det stilles derfor et stort krav til lagringskapasitet av hydrogen. Anlegget på Toten har høyeste overføring av energi til hydrogen, som igjen fører til høyt tap av energi. Med en hydrogenkostnad på 81,52 kr per kg er anlegget konkurransedyktig med dagens hydrogenpriser på 90 kr per kg [40]. Energikostnaden er også her høy sammenlignet med dagens energipriser.

5.2 Lønnsomhet

Med dagens priser på komponenter som inngår i anleggene er ikke slike anlegg lønnsomme. Produksjonen av komponenter er per dags dato lav, og priser på komponenter er høy. For at energiproduksjon med hydrogen som energibærer skal bli lønnsomt, er det avgjørende at investeringskostnadene synker. For å skape masseproduksjon må trolig staten legge frem støtteordninger til denne typen energiproduksjon.

5.3 Bærekraft

Fornybar energiproduksjon med hydrogen som energibærer har under produksjon et nullutslipp. Det vil være utslipp under produksjon av komponenter, mengden utslipp er avhengig av fabrikkens- og anleggets plassering. Hvis gårdsbruk erstatter energibehovet til diesel og gass med elektrisk energi og hydrogen, vil klimafotavtrykket innen landbruk reduseres betydelig. Det vil føre til bærekraftig utvikling innen landbruk, men også potensielt andre sektorer som eksempelvis transport. Klimafotavtrykket innenfor landbruket kan ved erstatning av fossile- til fornybare energikilder, føre til klimanøytrale driftsenheter.

Ved utbygging av hydrogenproduserende anlegg som baserer seg på fornybare energikilder, vil fossile energikilder kunne erstattes. Flytransport, båttransport, lastebiltransport og

landbruket vil redusere utslippene betydelig [33], noe som samsvarer med FN's klimamål nummer 13, om å stoppe klimaendringene [36]. Ved utbygging av hydrogenproduserende anlegg på øysamfunn, vil det sikre pålitelig, bærekraftig og moderne energi til en overkommelig pris for alle, noe som samsvarer med FN's bærekraftsmål nummer 7 [37]. Ved å introdusere hydrogenproduserende anlegg basert på fornybar energi i industrien og til utvikling av infrastruktur, vil det være et stort potensial til å redusere klimafotavtrykket og bidra til bærekraftig utvikling. Ved å erstatte fossile- til fornybare energikilder, samt endre produksjon mot bærekraftige produkt, vil industrien bli mer fremtidsrettet og innfri FN's bærekraftsmål nummer 9, delmål 9.2 og 9.3 [38].

5.4 Usikkerhet

Siden det har vært utfordringer med å finne sikre kilder i oppgaven, er det knyttet usikkerhet til kostnader. Usikkerheten vil føre til utslag på LCOH og kostnad per kWh, men resultater i oppgaven vil være nyttig til å sammenligne casene, og dermed ulike fornybare energikilder i hydrogenproduserende anlegg.

6 Konklusjon

Oppgaven undersøker potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk. Det er blitt undersøkt tre enkeltstående energiproduserende anlegg, og gjort sammenligning på bakgrunn av LCOH og kostnad per kWh.

Resultatene fastslår at case 1 på Hitra i Trøndelag bestående av en vindmølle som fornybar energikilde, har den klart mest kostnadseffektive produksjonen av energi med LCOH på 64,73 kr/kg. På grunn av gunstig plassering med gode vindressurser, oppnår vindmøllen høy produksjon sammenlignet med case 2 på Innherred i Trøndelag.

Case 2 har høyest kostnad per produserte enhet av både strøm og hydrogen, som følge av lav kapasitetsfaktor på både vindmølle og solcelleanlegg, noe som fører til økte kostnader videre i produksjonen. Case 2 har allikevel best forsyningsevne med energi, fordi solcellene og vindmøllen utfyller hverandre godt. Det konkluderes med at anlegg som baserer seg på både sol- og vindkraft er avhengig av vesentlig større produksjon, på grunn av høy investeringskostnad.

Case 3 på Toten i Innlandet bestående av solceller som fornybar energikilde, har høyere total kostnad enn case 1, men lavere enn case 2. Case 3 har også bedre kapasitetsfaktor på solcelleanlegget enn case 2, grunnet høyere solinnstråling. Det konkluderes med at case 3 ikke er gjennomførbart på bakgrunn av høye kostnader på grunn av lineære priser på solceller, samt at det er plasskrevende.

Det konkluderes med at case 1 har en konkurransedyktig LCOH, mens case 2 og 3 har noe høy LCOH. Alle tre casene har meget høy kostnad per utnyttede kWh, og de er derfor ikke lønnsomme per dags dato. Prisen på komponenter må ned for å skape lønnsomhet.

Det konkluderes med at det ikke vil være lønnsomt å produsere hydrogen som drivstoff innen landbruk, på bakgrunn av dagens dieselpriser. Med dagens økende dieselpriser, vil hydrogen på kort tid bli et billigere drivstoff enn diesel, gitt at prisen på hydrogen ikke øker tilsvarende. Det forutsetter at produksjonen er høy, slik at kostnader fordeles på flere gårdsbruk.

Skal hydrogen benyttes til drivstoff innen landbruk, må det være traktorer tilgjengelig på markedet til en overkommelig pris. Prisen på hydrogendrevne traktorer må være konkurransedyktig med dagens fossile traktorer.

6.1 Videre arbeid

Hydrogenproduksjon medfører tap i elektrolyser og brenselcelle, som igjen fører til lav effektivitet. Energitap fra friksjonsenergi i prosessen blir omdannet til varme, som kan utnyttes til oppvarming av driftsbygninger, eller kobles til fjernvarmeanlegg. Med gode løsninger på plassering og varmegjenvinning, vil totalprosessene og totaleffektiviteten økes. Ved økt effektivitet vil totalkostnadene synke, og slike anlegg vil bli mer kostnadseffektive. Undersøkelser av sammenhengen mellom økt effektivitet og kostnad er interessant for videre arbeid med oppgaven.

Referanseliste

- [1] Batteriet. Kirkenes: AvDir; 2019 [hentet 15. mars 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.batteriet.no/ressurssider/kart-norge/>
- [2] Norsk solenergiforening. Solceller. Norge: Norsk solenergiforening; 2022 [Hentet 17. mars 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.solenergi.no/solstrm>
- [3] Solar Power World. How do power optimizers help harvest more energy from solar projects. United States: Kathie Zipp; 18. november [Hentet 17.mars 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.solarpowerworldonline.com/2015/11/23495/>
- [4] Alfa Energi. Vær din egen strømprodusent. Vikeså: Alfa Energi; u.å. [hentet 20. mars 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.alfaenergi.no/solcelleanlegg/>
- [5] Otovo. Solceller i Norge – hvor effektive er de?. Otovo: Oktober 2022 [Hentet 20. mars 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.otovo.no/blog/solcellepanel-solceller/solceller-norge-virkningsgrad/>
- [6] Lamb JJ. Solenergi [forelesningsnotat]. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet; 2021.
- [7] Store norske leksikon. Kapasitetsfaktor. Norge: Snl [oppdatert 26. desember 2021; hentet 25. mars 2022]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/kapasitetsfaktor>
- [8] NVE. Vindkraft. Norge: NVE; 01.11.2019 [oppdatert 20 april 2022; hentet 30. mars 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/>
- [9] NVE. Kraftproduksjon fra vindturbiner. Norge: NVE; 01. november 2019 [oppdatert 31. mars 2022; hentet 2. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/kraftproduksjon-fra-vindturbiner/>
- [10] Lamb JJ. Hydrogen [forelesningsnotat]. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet; 2021.
- [11] Statkraft. Hydrogen: Bedre enn batteri til de tyngste oppgavene. Oslo: Statkraft; u.å. [hentet 2. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.statkraft.no/nyheter/nyheter-og-pressemedlinger/arkiv/2019/hydrogen--bedre-enn-batteri-til-de-tyngste-oppgavene/>

- [12] ScienceDirect. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. Tyskland: Alexander Buttler; 9. September 2017 [oppdatert februar 2018; hentet 3. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211731242X>
- [13] Camera FL. Green hydroge cost reduction. Tyskland: Irena; 2020. ISBN-rapport 978-92-9260-295-6
- [14] Store norske leksikon. Brenselcelle. Trondheim: Geir Martin Haarberg; 4. januar 2021 [hentet 5. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/brenselcelle>
- [15] TU. Selv med batteriframskritt: Vi kommer ikke utenom hydrogen. Norge: Odd Richard Valmot; 9. januar 2021 [hentet 6. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/selv-med-batteriframskritt-vi-kommer-ikke-utenom-hydrogen/504859>
- [16] ScienceDirect. Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Tyskland: Pi Sharma; 2022 [hentet 7. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/proton-exchange-membrane-fuel-cell>
- [17] The electrochemical society. Proton exchange membrane or polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells. Canada: ECS; 2011 [hentet 7. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-f04-fuel-cells-pem.htm>
- [18] Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Hydrogen i fremtidens lavkarbonsamfunn. Trondheim: NTNU; 28. mars 2019. ISBN-rapport 978-82-93198-31-4
- [19] Green Car Congress. Ricardo and alkaline fuel cell company AFC Energy collaborate on hydrogen applications for marine, rail and stationary. USA: Mike Millikin; 15. Januar 2021 [hentet 10. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.greencarcongress.com/2021/01/20210115-afc.html>
- [20] Wind-turbine-models. Vestas V27. Danmark: wind-turbine-models; u.å. [hentet 16. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/9-vestas-v27>

- [21] NVE. Tall og fakta. NVE; u.å. [hentet 10. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/tall-og-fakta/>
- [22] Europe-solarshop. REC 285 TP2 BLK. England: Europe-solarshop; u.å. [hentet 10. april 2022]. Tilgjengelige fra: <http://www.europe-solarshop.com/rec-285-tp2-blk.html>
- [23] European Commission. Photovoltaic geographical information system. PVGIS 5.2 Beta. Europa: European Commission; u.å. [hentet 5. mars 2022]. Tilgjengelig fra: JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission (europa.eu)
- [24] Eidem B. Årsforbruk av biodiesel og annet flytende drivstoff i norsk landbruk. Oslo: Ruralis; 15. mars 2020 [hentet 15. april 2022]. ISSN 1503-2027.
- [25] Norgesvel. Energisituasjonen på gårdsbruk i dag – hvordan kan solenergi bidra. Oslo: Norgesvel; 15. januar 2019 [hentet 13. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://klimaostfold.no/wp-content/uploads/2019/01/5-Energi-p%C3%A5-g%C3%A5rdsbruk-Norges-Vel.pdf>
- [26] Nel. PEM electrolyser. Oslo: Nelhydrogen; u.å. [hentet 2. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://nelhydrogen.com/product/c10-c20-c30/>
- [27] Ballard. FCvelocity – HD. Canada: Ballard; juni 2016 [hentet 6 april 2022]. Tilgjengelig fra: https://www.ballard.com/docs/default-source/motive-modules-documents/fcvelocity_hd_family_of_products_low_res.pdf
- [28] BloombergNEF. Battery Pack Prices Fall to an Average of 132 dollar/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite. London: BloombergNEF; 30. november 2021 [hentet 14. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>
- [29] Battelle. Manufacturing cost analysis of 100 and 250 kW fuel cell systems for primary power and combined heat and power applications. USA: Battelle memorial Institute; januar 2017 [hentet 20. april 2022]. Tilgjengelig fra: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/02/f49/fcto_battelle_mfg_cost_analysis_100_250kw_pp_chp_fc_systems_jan2017.pdf
- [30] NVE. Temakart vindressurser. Oslo: NVE; u.å. [hentet 18. april 2022]. Tilgjengelig fra: <https://temakart.nve.no/link/?link=vindressurser>

- [31] Homerenergy. Homer Pro. Homer Pro 3.15. USA: Homer; u.å. [hentet 2. mai 2022]. Tilgjengelig fra:
https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/hydrogen_tank.html
- [32] NVE. Hydrogenproduksjon ved småkraftverk. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat; desember 2019 [hentet 27. april 2022]. Tilgjengelig fra:
https://publikasjoner.nve.no/eksternrapport/2019/eksternrapport2019_10.pdf
- [33] NREL. Hydrogen station compression, storage, and dispensing technical status and cost. United states: U.S Department of Energy; mai 2014 [hentet 4. mai 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/58564.pdf>
- [34] NREL. Battery lifespan. United states: NREL transforming energy; u.å. [hentet 4. mai 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.nrel.gov/transportation/battery-lifespan.html>
- [35] Sagen k. Nett: Transformatorforvaltning. Oslo: Energi Norge; u.å. [hentet 6. mai 2022]. Tilgjengelig fra:
<https://www.energinorge.no/fagomrader/forskning/forskningsprosjekter/nett/transformatorforvaltning/>
- [36] FN. 13 stoppe klimaendringene. USA: FN-sambandet; [oppdatert 23. februar 2022; hentet 10. mai 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/stoppe-klimaendringene>
- [37] FN. 7 ren energi til alle. USA: FN-sambandet; [oppdatert 23. februar 2022; hentet 10. mai 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ren-energi-til-alle>
- [38] FN. 9 industri, innovasjon og infrastruktur. USA: FN-sambandet; [oppdatert 23. februar 2022; hentet 10. mai 2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/industri-innovasjon-og-infrastruktur>
- [39] Lyngved K, Mickelborg T, Teigmoen A. Active load management in microgrids. Trondheim: NTNU; Mai 2019 [Hentet 20. mars 2022]. Tilgjengelig fra:
Bacheloroppgave 2019 - Lyngved et al - Active load management in microgrids (2).pdf
- [40] Hyop. Din leverandør av hydrogen. Hyop; u.å. [Hentet 9. mai 2022]. Tilgjengelig fra:
<https://hyop.no/>

Vedlegg

A Begninger kapasitetsfaktor og årsproduksjon vindkraft

Case 1 på Hitra i Trøndelag er beregnet med data fra NVE. Case 2 på Innherred i Trøndelag er beregnet med data fra Rye Wind.

Kapasitetsfaktor case 1 Hitra Trøndelag:

$$C_p = \frac{\text{Årlig energiproduksjon}}{\text{Teoretisk maksimal energiproduksjon}} = \frac{290\,000 \text{ MWh}}{93.6 \text{ MW} \cdot 8760 \text{ h}} = \mathbf{0.354}$$

Årsproduksjon case 1 Hitra Trøndelag:

$$\text{Årlig produksjon} = \text{kapasitetsfaktor} \cdot \text{effekt} \cdot 8760 \text{ timer i året}$$

$$\text{Årlig produksjon} = 0.354 \cdot 225 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h} = \mathbf{680.0 \text{ MWh}}$$

Kapasitetsfaktor case 2 Innherred Trøndelag:

$$C_p = \frac{\text{Årlig energiproduksjon}}{\text{Teoretisk maksimal energiproduksjon}} = \frac{218\,300 \text{ kWh}}{225 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h}} = \mathbf{0.111}$$

Årlig produksjon case 2 Innherred Trøndelag:

$$\text{Årlig produksjon} = \text{kapasitetsfaktor} \cdot \text{effekt} \cdot 8760 \text{ timer i året}$$

$$\text{Årlig produksjon} = 0.111 \cdot 225 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h} = \mathbf{218.8 \text{ MWh}}$$

B Begninger kapasitetsfaktor og årsproduksjon solkraft

Case 2 på Innherred i Trøndelag er beregnet med data fra PVGIS og Remote Prosjekt på Rye.
Case 3 er beregnet med data fra PVGIS.

Installert effekten til et solcelleanlegg er gitt av formelen: [6]

$$P = \text{solstråling} \cdot \text{areal} \cdot \text{effektivitet}$$

$$\text{Case 2: } P_2 = PV \cdot 2\,500 \text{ m}^2 \cdot 0.177 = \mathbf{358.3 \text{ kW}}$$

$$\text{Case 3: } P_3 = PV \cdot 4\,000 \text{ m}^2 \cdot 0.177 = \mathbf{573.3 \text{ kW}}$$

Kapasitetsfaktor til et solcelleanlegg er gitt av formelen:

$$C_p = \frac{\text{Årlig energiproduksjon}}{\text{Teoretisk maksimal energiproduksjon}}$$

$$\text{Case 2: } C_2 = \frac{284\,200 \text{ kWh}}{358.3 \cdot 8760 \text{ t/h}} = \mathbf{0.091}$$

$$\text{Case 3: } C_3 = \frac{554\,200 \text{ kWh}}{573.3 \cdot 8760 \text{ t/h}} = \mathbf{0.011}$$

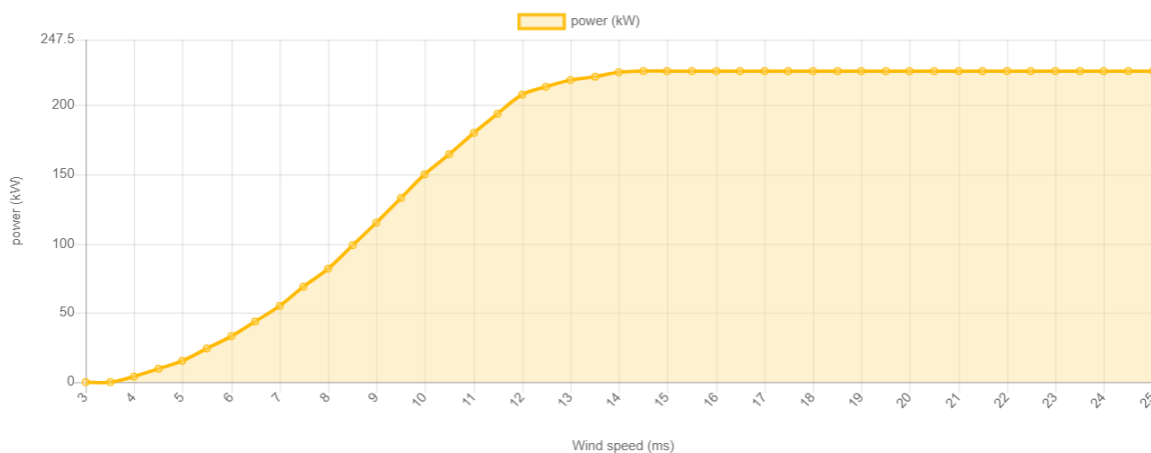
Årlig produksjon til et solcelleanlegg er gitt av formelen: [6]

$$\text{Årlig produksjon} = \text{kapasitetsfaktor} \cdot \text{effekt} \cdot 8760 \text{ timer i året}$$

$$\text{Case 2: } \text{Årlig produksjon}_2 = 0.091 \cdot 358.3 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h/år} = \mathbf{284.2 \text{ MWh}}$$

$$\text{Case 3: } \text{Årlig produksjon}_3 = 0.011 \cdot 573.3 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h/år} = \mathbf{554.2 \text{ MWh}}$$

B Effektkurve Vestas V27 vindturbin



Figur 36 viser effektkurve Vestas V27 vindturbin.

C Tabeller vindforhold og produksjon, NVE

Kraftverknavn	Fylke	Kommune	Produksjon oppstart	Installert effekt [MW]	Middelproduksjon [GWh]	Antall turbiner	Prisområde	NVEs kraftverkside	Til konsesjon
Sørmarkfjellet	Trøndelag	Flatanger	2021	130,2	485	31	3	🔗	🔗
Stokkfjellet	Trøndelag	Selbu	2021	88,2	311	21	3	🔗	🔗
Frøya	Trøndelag	Frøya	2020	58,8	197	14	3	🔗	🔗
Geitfjellet	Trøndelag	Orkland	2020	180,6	546	43	3	🔗	🔗
Harbaksfjellet	Trøndelag	Åfjord	2020	126,0	474	30	3	🔗	🔗
Kvenndalsfjellet	Trøndelag	Åfjord	2020	113,4	405	27	3	🔗	🔗
Hitra 2	Trøndelag	Hitra	2019	93,6	290	26	3	🔗	🔗
Storheia	Trøndelag	Åfjord	2019	288,0	973	80	3	🔗	🔗
Valsneset vindkraftverk	Trøndelag	Ørland	2019	12,6	45	3	3	🔗	🔗
Roan	Trøndelag	Åfjord	2018	255,6	900	71	3	🔗	🔗
Rye Vind	Trøndelag	Trondheim	2015	0,2	0	1	3	🔗	🔗
Skomakerfjellet	Trøndelag	Åfjord	2015	13,2	36	4	3	🔗	🔗
Ytre Vikna	Trøndelag	Nærøysund	2012	39,1	103	17	3	🔗	🔗
Bessakerfjellet	Trøndelag	Åfjord	2007	57,5	175	25	3	🔗	🔗
Valsneset	Trøndelag	Ørland	2006	11,5	35	5	3	🔗	🔗
Hitra	Trøndelag	Hitra	2004	55,2	138	24	3	🔗	🔗
Hundhammerfjellet	Trøndelag	Nærøysund	1998	55,0	211	14	3	🔗	🔗

Figur 37 viser installert effekt og årsproduksjon fra vindkraft i Trøndelag.

D Beregninger årsproduksjon brenselcelle

Årsproduksjon brenselcelle		Utrekning er i MWh		
Mnd	Strøm fra brenselcelle pr mnd	Case 1	Case 2	Case 3
Jan	21,12	8,6592	7,6032	9,7152
Feb	20,16	8,2656	7,2576	9,2736
Mar	17,28	7,0848	6,2208	7,9488
Apr	15,36	6,2976	5,5296	7,0656
Mai	13,44	5,5104	4,8384	6,1824
Jun	11,52	4,7232	4,1472	5,2992
Jul	11,52	4,7232	4,1472	5,2992
Aug	13,44	5,5104	4,8384	6,1824
Sep	15,36	6,2976	5,5296	7,0656
Okt	16,32	6,6912	5,8752	7,5072
Nov	18,24	7,4784	6,5664	8,3904
Des	20,16	8,2656	7,2576	9,2736
SUM		79,5072	69,8112	89,2032

Figur 38 viser beregning av årsproduksjon brenselcelle.

E Beregninger årsproduksjon drivstoff H₂

Årsproduksjon drivstoff hydrogen				
Mnd	Case 1	Case 2	Case 3	Tapsfaktor ved kompsjon
Jan	11,0903	0	0	89,80 %
Feb	20,37562	0	0	
Mar	40,40102	17,39426	13,6047	
Apr	21,6418	21,61486	29,20296	
Mai	8,61182	20,07928	38,01234	
Jun	17,11588	23,65332	43,22972	
Jul	21,9561	28,30496	30,88222	
Aug	6,85174	19,99846	8,98	
Sep	16,37054	9,26736	0	
Okt	29,0503	0	0	
Nov	29,33766	0	0	
Des	23,90476	0	0	
SUM	246,70754	140,3125	163,91194	

Figur 39 viser beregning av årsproduksjon drivstoff H₂

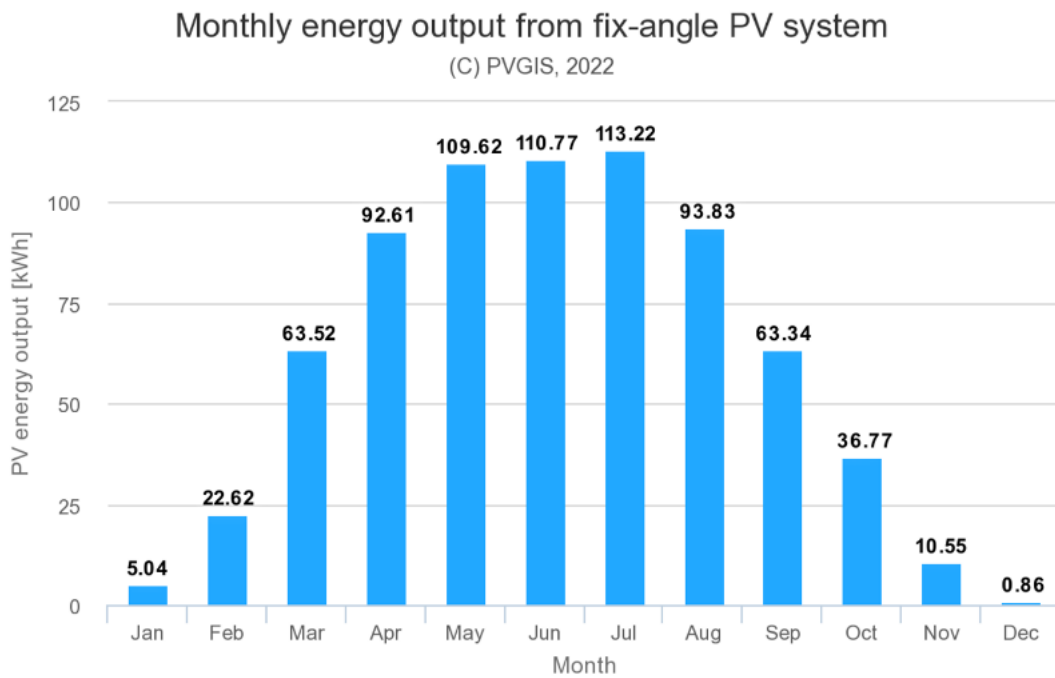
F Beregninger LCOH

år	Case 1 kost	Case 1 prod	Case 2 kost	Case 2 prod	Case 3 kost	Case 3 prod	Data	Case 1	Case 2	Case 3
1	731673,1481	11323,1481	783275,0000	7579,6296	749512,9630	9209,2593	Kost per år	763 600	812 880	784 480
2	677475,1372	10484,3964	725254,6296	7018,1756	693993,4842	8527,0919	Drift per år	26 607	33 057	24 994
3	627291,7937	9707,7745	671532,0645	6498,3107	642586,5595	7895,4555	Avvikling år 25	100 000	100 000	100 000
4	580825,7349	8988,6801	621788,9486	6016,9544	594987,5551	7310,6069	Masse h2 per år	12229	8186	9946
5	537801,6064	8322,8519	575730,5079	5571,2541	550914,4028	6769,0805	kapkost rente	8 %	8 %	8 %
6	497964,4504	7706,3444	533083,8037	5158,5686	510105,9286	6267,6671				
7	461078,1948	7135,5040	493596,1145	4776,4524	472320,3042	5803,3955				
8	426924,2544	6606,9482	457033,4393	4422,6411	437333,6150	5373,5143				
9	393300,2356	6117,5446	423179,1105	4095,0380	404938,5324	4975,4762				
10	366018,7366	5664,3932	391832,5097	3791,7019	374943,0856	4606,9224				
11	338906,2376	5244,8085	362807,8794	3510,8351	347169,5237	4265,6689				
12	313802,0719	4856,3042	335933,2216	3250,7732	321453,2627	3949,6934				
13	29057,4740	4496,5779	311049,2793	3009,9752	297641,9099	3657,1236				
14	269034,6981	4163,4981	288008,5919	2787,0141	275594,3610	3386,2255				
15	249106,2020	3855,0908	266674,6222	2580,5686	255179,9639	3135,3940				
16	230653,8907	3569,5285	246920,9465	2389,4154	236277,7443	2903,1426				
17	213568,4173	3305,1190	228630,5060	2212,4216	218775,6892	2688,0950				
18	197748,5346	3060,2954	211694,9129	2048,5386	202570,0826	2488,9768				
19	183100,4950	2833,6088	196013,8083	1896,7950	187564,8913	2304,6082				
20	169537,4953	2623,7100	181494,2669	1756,2916	173671,1956	2133,8965	LCOH Case 1	64,729	kr/kg H2	
21	156979,1623	2429,3611	168050,2472	1626,1959	160889,0580	1975,5301	LCOH Case 2	103,507	kr/kg H2	
22	145351,0762	2249,4085	155602,0807	1505,7370	148895,0880	1829,4773	LCOH Case 3	81,524	kr/kg H2	
23	134584,3299	2082,7856	144076,0006	1394,2009	137865,7944	1693,9558				
24	124615,1202	1928,5052	133403,7043	1290,9268	127653,5134	1568,4776				
25	129986,1611	1785,6530	138123,7389	1195,3026	132799,4881	1452,2941				
SUM	8449884,658	130541,838	9044789,935	87383,7179	8655555,571	106171,324				

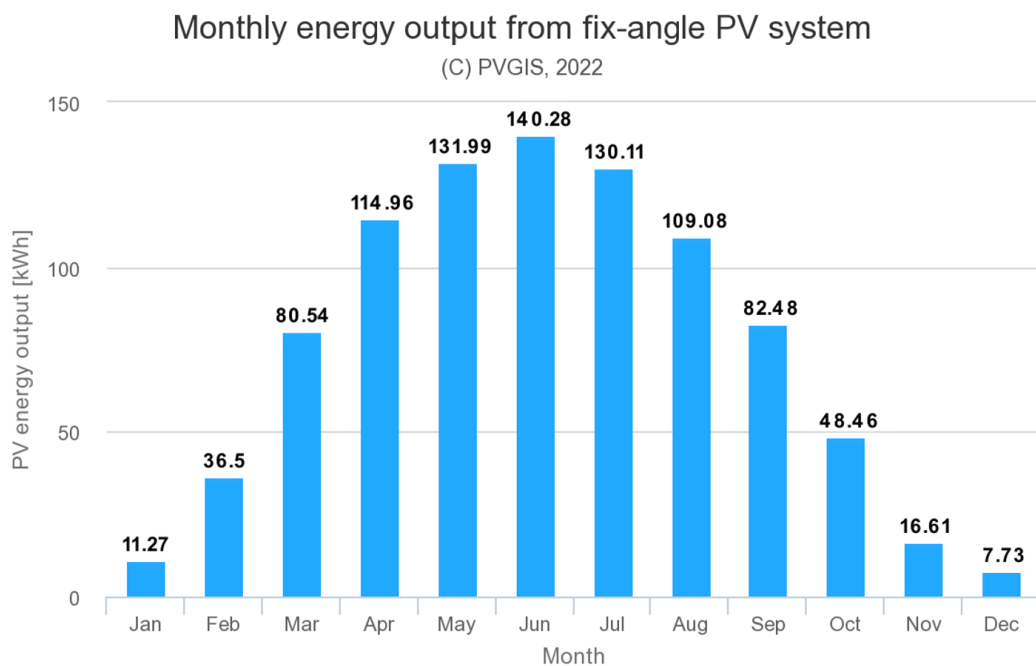
$LCOH = \frac{\sum_{t=0}^n K_t + D_t + A_t}{\sum_{t=0}^n \frac{m_{H_2}}{(1+r_t)^t}}$
 $D_t =$ Arlige driftsavgifter (t) [euro]
 $A_t =$ Avviklingsavgifter (a+1) [euro]
 $t =$ Hvert individuelle år i prosjektet
 $n =$ Levetid til prosjektet
 $r_t =$ Gjennittkapitalkostnad [%]
 $m_{H_2} =$ Produsert hydrogen pr år [kg]

Figur 40 viser utregning av LCOH.

G Graf PV solceller

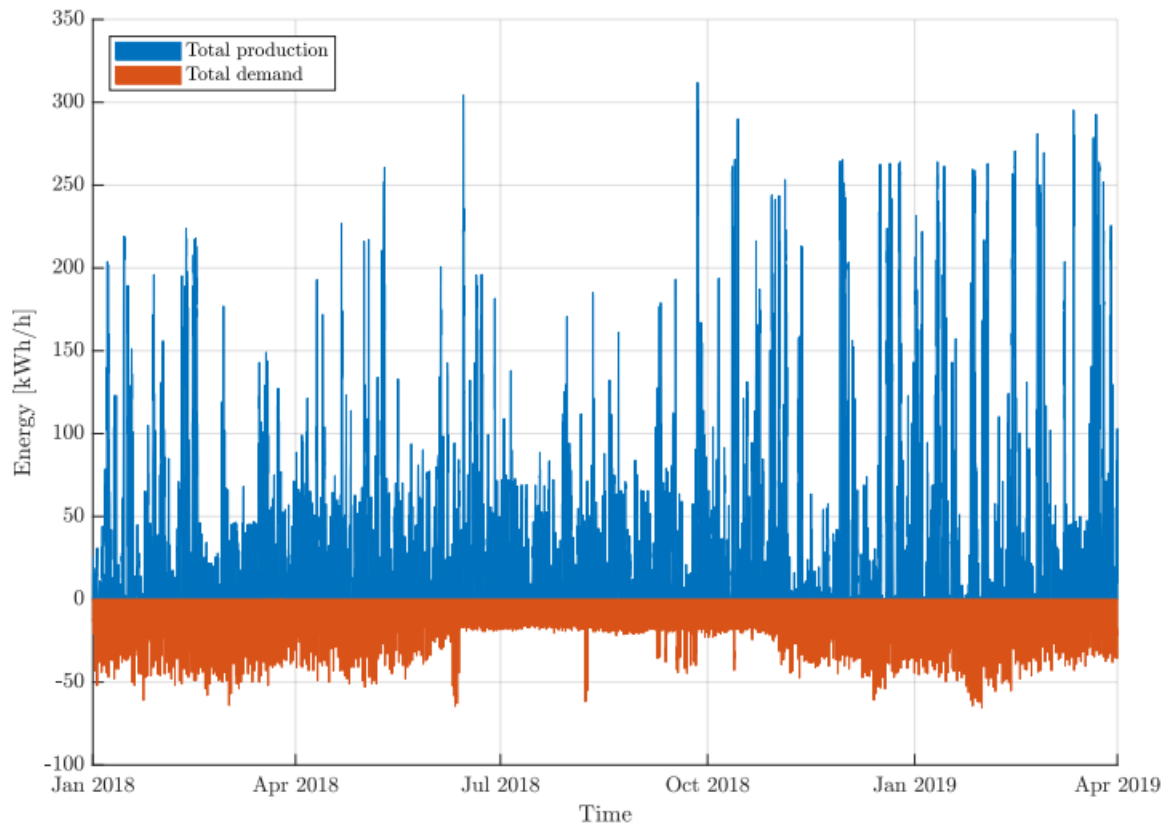


Figur 41 viser PV energi i case 2.



Figur 42 viser PV energi i case 3.

H Produksjonsprofil



Figur 43 viser produksjonsprofil og energibehov i systemet [39].

I Kostnader

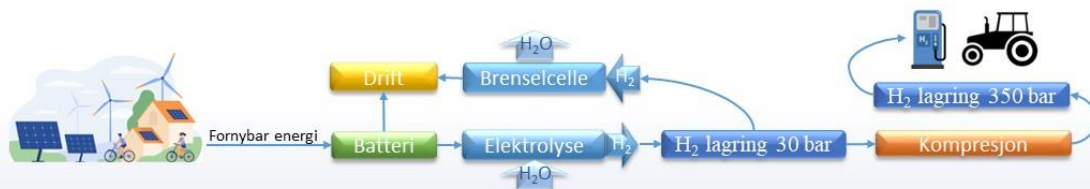
år	5 tusen	4 tusen	1 tusen	2 tusen	0,5 tusen	
1	5,175	4,14	1,035	2,07	0,5175	Inflasjonsrente på 3,5%
2	5,356125	4,2849	1,071225	2,14245	0,5356125	
3	5,543589375	4,4348715	1,108717875	2,21743575	0,554358938	
4	5,737615003	4,590092003	1,147523001	2,295046001	0,5737615	
5	5,938431528	4,750745223	1,187686306	2,375372611	0,593843153	
6	6,146276632	4,917021305	1,229255326	2,458510653	0,614627663	
7	6,361396314	5,089117051	1,272279263	2,544558526	0,636139631	
8	6,584045185	5,267236148	1,316809037	2,633618074	0,658404518	
9	6,814486766	5,451589413	1,362897353	2,725794707	0,681448677	
10	7,052993803	5,642395042	1,410598761	2,821197521	0,70529938	
11	7,299848586	5,839878869	1,459969717	2,919939434	0,729984859	
12	7,555343287	6,044274629	1,511068657	3,022137315	0,755534329	
13	7,819780302	6,255824241	1,56395606	3,127912121	0,78197803	
14	8,093472612	6,47477809	1,618694522	3,237389045	0,809347261	
15	8,376744154	6,701395323	1,675348831	3,350697662	0,837674415	
16	8,669930199	6,935944159	1,73398604	3,46797208	0,86699302	
17	8,973377756	7,178702205	1,794675551	3,589351102	0,897337776	
18	9,287445978	7,429956782	1,857489196	3,714978391	0,928744598	
19	9,612506587	7,690005269	1,922501317	3,845002635	0,961250659	
20	9,948944317	7,959155454	1,989788863	3,979577727	0,994894432	
21	10,29715737	8,237725895	2,059431474	4,118862947	1,029715737	
22	10,65755788	8,526046301	2,13151575	4,263023151	1,065755788	
23	11,0305724	8,824457922	2,20611448	4,412228961	1,10305724	
24	11,41664244	9,133313949	2,283328487	4,566656974	1,141664244	
25	11,81622492	9,452979937	2,363244984	4,726489969	1,181622492	
SUM	201,5655084	161,2524067	40,31310168	80,62620336	20,15655084	
Fase	Case 1 drift	Case 2 drift	Case 3 drift			
Drift og vedlikehold	kr 665,17	kr 826,42	kr 624,85			
Totalt m drift og ved	kr 19 755,17	kr 21 148,42	kr 20 236,85			

Figur 44 viser beregninger av kostnader.

J Poster



Undersøkelse av potensialet til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk

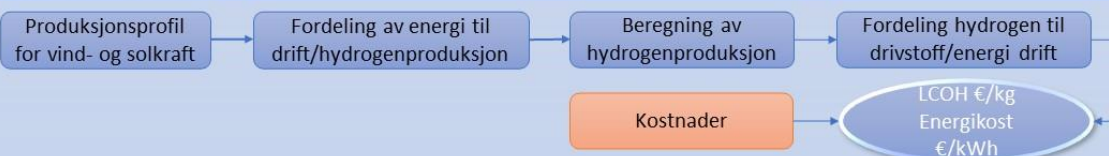


Formål

Bacheloroppgaven har som formål å undersøke potensiale til hydrogen som energibærer og drivstoff innen landbruk. Hydrogen har et stort potensiale innen energiproduksjon, siden det kan benyttes som energibærer med lite tap. Remote Project sitt anlegg på Rye baserer seg på sol- og vindkraft og benytter hydrogen som energibærer. Prosjektet har vært til inspirasjon.

Teknisk data	Case 1	Case 2	Case 3
Vindmølle Vestas V27 [kW]	225	225	-
Solceller REC TP2 [kW]	-	358	573
Batterikapasitet [kWh]	1000	550	550
Elektrolyser PEMEL C20 [kW]	100	100	100
Brenselcelle PEM HD100 [kW]	100	100	100
Lagringstank 30/350 bar [kg]	100/1 500	100/1 500	100/1 500

Flyten i metoden



Produksjonsmetode

Casene produserer fornybar energi som lagres i batteri som korttidslagring og fordeles til drift eller til hydrogenproduksjon gjennom våtelektrolyse. Videre blir lagret hydrogen fra elektrolysen fordelt til brenselcellen for å dekke strømbehovet eller til drivstoff gjennom kompresjon til 350 bar. Kostnader for casene blir beregnet og brukes til å finne LCOH og kostnad per kWh benyttet energi.

Resultat	Case 1	Case 2	Case 3
LCOH [€/kg]	6,473	10,351	8,152
Energikost [NOK/kWh]	44,83	64,28	56,55
Total kostnad livsløp [Tusen NOK]	19 755	21 148	20 237
Energiproduksjon vindkraft [MWh]	680,0	218,8	-
Energiproduksjon solkraft [MWh]	-	284,20	554,21
Årlig produksjon hydrogen [MWh]	407,22	272,61	331,21
Årlig produksjon hydrogen [kg]	12 229	8 186	9 946
Årlig produksjon brenselcelle [MWh]	79,51	69,81	89,20
Årlig produksjon H ₂ drivstoff [MWh]	246,71	140,31	163,91
Årlig produksjon H ₂ drivstoff [kg]	7 409	4 214	4 922

Caser

Case 1 er plassert på Hitra i Trøndelag med vindkraft som energikilde.

Case 2 er plassert på Innherred i Trøndelag med sol- og vindkraft i kombinasjon som energikilde.

Case 3 er plassert på Toten i Innlandet med solkraft som energikilde.

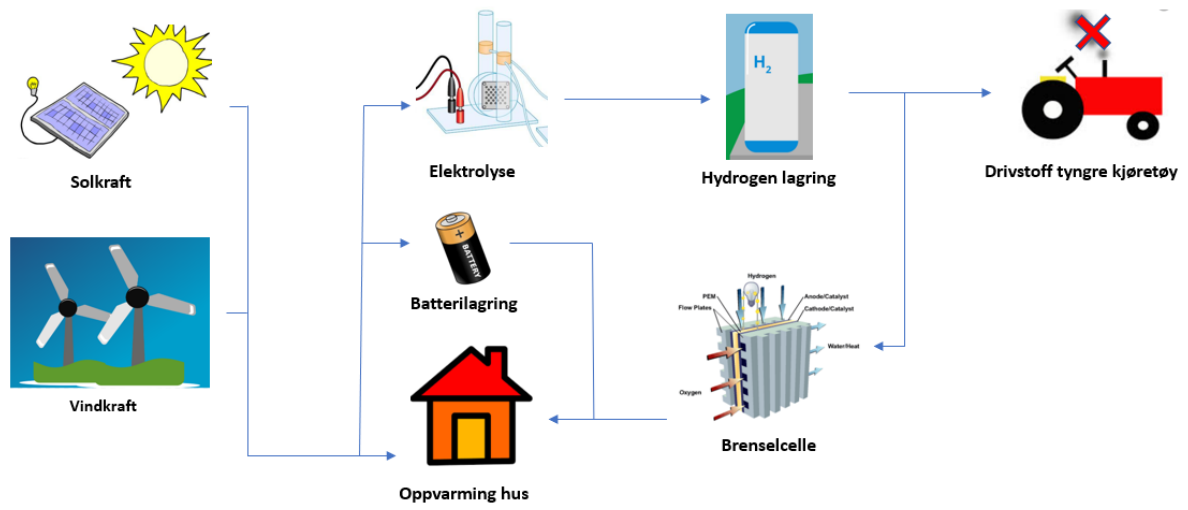
Konklusjon

Konklusjonen i oppgaven er at case 1 med vindkraft som fornybar energikilde har mest konkurransedyktig LCOH på 6,473 €/kg, mens case 2 og 3 har høy LCOH mot dagens priser. Energikosten i casene er ikke konkurransedyktig med dagens priser og det kreves teknologiske fremskritt og masseproduksjon for å skape konkurransedyktige priser.

Skrevet av Jonas Veie Daling, NTNU

Figur 45 viser poster.

K Prinsippskisse forprosjekt



Figur 46 viser prinsippskisse som ble utarbeidet i forprosjektet.

L Forprosjekt



Institutt for vareproduksjon og byggingteknikk

Bacheloroppgave, forprosjekt

Oppgavens tittel: Hydrogen som energibærer i fornybar energiproduksjon.	Gitt dato: 06.01.2022 Innleveringsdato: 15.02.2022 Antall sider/vedlegg: 13
Deltager: Jonas Veie Daling	Veileder: Thomas Haavi thomas.haavi@ntnu.no Tlf: +47 98 23 04 42
Studieretning: Maskiningeniør	Oppdragsgiver: NTNU og Sintef

Sammendrag

Bacheloroppgaven omhandler bruken av hydrogen som energibærer. Prosjektet skrives i samarbeid med NTNU, Sintef og TrønderEnergi. Både Sintef og TrønderEnergi har mange prosjekter samt forskning rundt ulike anvendelser av hydrogen. Oppgaven består av flere caser, der man ser på prosjektering av separate energiproduiserende anlegg basert på fornybar energi. Overskuddsenergi under produksjon vil lagres som hydrogen, som videre benyttes ved underproduksjon av energi. Muligheten for å bruke hydrogen som drivstoff i tyngre kjøretøy vil også bli undersøkt.

Det er utarbeidet arbeidsmål for å klargjøre videre arbeid med oppgaven. Det er utarbeidet fremdriftsplan og prosjektmål for å sikre god fremgang. Forprosjektet har utledet tema og problemstilling for oppgaven, litteraturstudier og forsøk skal underbygges i sluttrapporten.

Denne rapporten er et forprosjekt til hovedoppgaven der det planlegges kostnader, målsettinger og tidsforbruk.

Forord

Bacheloroppgaven er et avsluttende arbeid i tredje klasse ved NTNU i Gjøvik. Prosjektet utgjør 20 studiepoeng. Bacheloroppgaven skrives i samarbeid med NTNU, Sintef og TrønderEnergi. Remote Project har i samarbeid med blant annet Sintef og TrønderEnergi utviklet et anlegg som bruker hydrogen som energibærer. I oppgaven skal det ses på flere caser, med ulik dimensjonering i forhold til anlegges kapasitet og bruksområder.

Valget av oppgave kom på bakgrunn av interesse for fornybar energi og hydrogen som energibærer og hydrogen som drivstoff. Det er et ønske om å bidra til bærekraftig utvikling i energisektoren. Hensikten med forprosjektet er å definere tema, programstilling, omfang og planlegging. Forprosjektet vil være et grunnlag for sluttrapporten.

Prosjektet gjennomføres av en student som går maskiningeniør ved NTNU i Gjøvik. Ønsker å takke veileder fra NTNU og samarbeidspartner TrønderEnergi.

1. Innledning

1.1 Tema

Hydrogen som energibærer innen fornybar energiproduksjon.

1.2 Bakgrunn

Hydrogen har et stort potensiale innen energiproduksjon. Hydrogen kan brukes til lagring av energi til drivstoff og energiproduksjon. Vi skal se på løsninger for å produsere fornybar energi og videre bruke overskudsenergi til å produsere hydrogen.

Anlegget til Lars Hoem på Rye er et igangværende pilot-prosjekt, som tester muligheten for bruk av hydrogen som energibærer. Der brukes solceller og vindmøller til å produsere elektrisitet som videre forbrukes på gården. Overskuddet av produksjonen brukes til å produsere hydrogen. Når produksjonen er lav, brukes hydrogenet til å produsere elektrisitet til gården.

1.2 Problemstilling

Hvilket potensial har hydrogen til å være energibærer i et energiproduserende anlegg? Hvor effektivt er det å konvertere elektrisk energi over til hydrogen, og videre bruke denne innen drivstoff eller til å produsere elektrisk energi? Fornybare ressurser er ofte avhengig av plassering og årstid, hvordan kan hydrogen være med på å best dekke energibehovet?

1.4 Rammer

For å sikre god framgang på prosjektet er det bestemt rammer for arbeidet. Det tas utgangspunkt i å arbeide med oppgaven 4-5 dager i uken. Møte med veileder og kontaktpersoner skal helst avholdes hver andre uke. Det skal føres møtoreferat etter alle møter. På bacheloroppgaven er det estimert et timebruk på 600 timer. Det vil bli ført timelister.

Kostnader i oppgaven blir i hovedsak utgifter knyttet til forsøk og reise. Forsøk vil føre til et ressursbruk, siden forsøk utføres sammen med NTNU vil ressursbruken holde seg på et minimum.

2. Omfang

2.1 Oppgavespesifikasjoner

I dette prosjektet skal vi se nærmere på hydrogen som energibærer. Det vil bli besøk på ulike anlegg som bruker hydrogen som energibærer. Dimensjonering og effektiviteten i anlegg skal undersøkes. Videre skal muligheten for å produsere tilstrekkelig energi til drivstoff, i form av hydrogen undersøkes. Her vil det være en konvertering fra elektrisk energi til hydrogen, gjennom elektrolyse. Kostnadseffektive og bærekraftige løsninger vil bli undersøkt i prosjektet. Det skal tas utgangspunkt i flere caser, med produksjon av energi gjennom fornybare ressurser. Her vil det bli gjort sammenligninger på plassering av anlegg, kostnad per energienhet og dimensjonering når det gjelder å dekke energibehovet gjennom hele året. Det blir tatt utgangspunkt i at anleggene skal være selvforsynte hele året, og dermed ikke koblet til strømmettet.

3. Prosjektorganisering

3.1 Ansvarsforhold

Oppdragsgiver for prosjektet er NTNU og Sintef. Det er et samarbeid med TrønderEnergi om talldata. Kontaktperson er Thomas Haavi.

3.2 Øvrige roller og bemanning

Thomas Haavi er veileder. Oppgaven skrives av en person, det vil være et samarbeid med NTNU, Sintef og TrønderEnergi.

3.3 Prosjektdeltagere



Navn: Jonas Veie Daling

Alder: 22

E-post: jonasvd@ntnu.no

Tlf: +47 94 88 82 70

4. Planlegging, oppfølging og rapportering

4.1 Statusmøter, dokumentasjon og fremdriftsplan

Oppgaven skrives av en person, vil derfor ikke være et behov for statusmøter. Besøk og forsøk vil dokumenteres fortløpende. Det er skrevet fremdriftsplan, denne tas som utgangspunkt i fremgang i prosjekt. Det vil bli laget referater etter møte med veileder og kontaktpersoner. Timeliste blir ført under hele prosjektet.

5. Risikovurdering

5.1 Kritiske suksessfaktorer

I prosjektet vil muligheten for bruk av hydrogen som energibærer innen produksjon av fornybar energi bli undersøkt.

Kritiske suksessfaktorer for å avgjøre at prosjektet blir en suksess eller en fiasko er:

- Bærekraftighet rundt materialbruk og kostnad.
- Effektive prosesser med konvertering av energi fra elektrisitet til hydrogen og motsatt.
- Trygghet rundt lagring og oppbevaring av hydrogen.
- Mulighet til å produsere hydrogen som videre kan brukes til drivstoff.

5.2 Risikoevaluering

Det er godt mulig å nå prosjektmålet. Det må innhentes talldata rundt effektivitet og virkningsgrad til ulike anlegg basert på ulike energi-produserende/bærende kilder. Videre må dette analyseres, og resultatet vil gi svar på om dette er en løsning for fremtiden. Det anslås at muligheten for å nå prosjektmålet er gode. Starten av 2022 har vært preget av covid-19. Dette gjør fysisk arbeid til tider utfordrende.

6. Kvalitetssikring

6.1 Organisering av kvalitetssikring

For å sikre en god sluttrapport, er det planlagt faste rammer for arbeidet med rapporten. Det tas utgangspunkt i arbeid med sluttrapport onsdag til søndag i februar og mars måned, og videre alle ukens dager i april og mai.

Det vil avholdes møter med veileder og kontaktpersoner etter behov. Progresjonen i prosjektet sikres ved en målrettet fremdriftsplan.

6.2 Kvalitetssikring av kritiske suksessfaktorer

Kvalitetssikring av kritiske suksessfaktorer vil bli kontrollregnet hvis databasert, og vil bli testet flere ganger hvis fysiske tester. Kvalitetssikring av kritisk data/forsøk i prosjektet, vil kvalitetssikres i samarbeid med flere organ som Sintef, NTNU og Trønderenergi.

7. Gjennomføring og framdrift

7.1 Hovedaktiviteter

- Utarbeide tema og problemstilling
- Studere litteratur knyttet til problemstilling.
- Utarbeid forprosjekt
- Besøk på anlegget til Lars Hoem på Rye. Her brukes hydrogen som energibærer i et energiproduserende anlegg basert på sol- og vindkraft.
- I samarbeid med NTNU gjøre forsøk knyttet til problemstilling.
- Analysere resultater.
- Skrive sluttrapport.

7.2 Framtidsplan med milepæler og beslutningspunkter

Prosjektstyring er avgjørende for god fremgang i prosjektet. Nedenfor er gantt-diagram for framdrift vedlagt.

Gantt-diagram



Figur 47 viser Gantt-diagram.

7.3 Kostnader og finansiering

Budsjettforslag

Tabell 23 viser budsjettforslag.

Enhet	Antall	Pris
Reise	10	1000,-
Forsøk materielt utstyr	5	5000,-
Forsøk råvarer	5	4000,-

8. Mulig etiske miljømessige utfordringer

8.1 Etiske utfordringer

Etiske utfordringer som prosjektet kan føre til:

- Valg av energibærere.
- Kostnad opp mot miljømessige konsekvenser.
- Videreutvikling av teknologi på områder der det allerede finnes andre løsninger.

8.2 Miljømessige utfordringer

Miljømessige utfordringer som prosjektet kan føre til:

- Bruk av fossile kilder i utvikling og produksjon.
- Lav effektivitet kan føre til høy bruk av energi.
- Underdimensjonerte anlegg kan føre til bruk av fossile kilder.

9. Innovasjon

Prosjektet skal se på muligheten for å skape nyskapende teknologi innen bruk av energi. Effektivisering og bruk av fornybar energi, vil føre til bærekraftig utvikling. Prosjektet har som fokus å utvikle løsninger som senker klimafotavtrykket. Potensielt kan prosjektet videreutvikle ny teknologi, som medfører positive endringer for samfunnet og klimaet.

10. Kontrakter og avtaler



STANDARDAVTALE

om utføring av studentoppgave (oppgave) i samarbeid med ekstern virksomhet.

Avtalen er ufravikelig for studentoppgaver ved NTNU som utføres i samarbeid med ekstern virksomhet.

Partene har ansvar for å klarere eventuelle immaterielle rettigheter som NTNU, den eksterne eller tredjeperson (som ikke er part i avtalen) har til prosjektbakgrunn før bruk i forbindelse med utførelse av oppgaven. Eierskap til prosjektbakgrunn skal fremgå av eget vedlegg til avtalen der dette kan ha betydning for utførelse av oppgaven.

1. Avtaleparter

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) Institutt: Vareproduksjon og byggteknikk
Veileder ved NTNU: Thomas Haavi e-post: thomas.haavi@ntnu.no tlf: +47 98 23 04 42
Student: Jonas Veie Daling Fødselsdato: 05.10.99

2. Utførelse av oppgave

Studenten skal utføre: (sett kryss)

Masteroppgave	
Bacheloroppgave	x
Prosjektoppgave	
Annen oppgave	

Startdato: 01.01.2022
Sluttdato: 02.06.2022

Oppgavens arbeidstitel er: Hydrogen som energibærer i fornybar energiproduksjon

Ansvarlig veileder ved NTNU har det overordnede faglige ansvaret for utforming og godkjenning av prosjektbeskrivelse og studentens læring.

3. Ekstern virksomhet sine plikter

Ekstern virksomhet skal stille med en kontaktperson som har nødvendig faglig kompetanse til å gi studenten tilstrekkelig veiledning i samarbeid med veileder ved NTNU. Ekstern kontaktperson fremgår i punkt 1.

Formålet med oppgaven er studentarbeid. Oppgaven utføres som ledd i studiet. Studenten skal ikke motta lønn eller lignende godtgjørelse fra den eksterne. Utgifter knyttet til gjennomføring av oppgaven skal dekkes av den eksterne. Aktuelle utgifter kan for eksempel være reiser, materialer for bygging av prototyp, innkjøp av prøver, tester på lab, kjemikalier. Studenten skal klarere dekning av utgifter med ekstern virksomhet på forhånd.

Ekstern virksomhet skal dekke følgende utgifter til utførelse av oppgaven:

- Ved laboratoriearbeid.
- Forsøk knyttet til prosjektet.
- Reise som følge av prosjektet.
- Generelle utgifter i forbindelse med gjennomføring av prosjektet.
- Programvarer.

Dekning av utgifter til annet enn det som er oppført her avgjøres av den eksterne underveis i arbeidet.

4. Studentens rettigheter

Studenten har opphavsrett til oppgaven¹. Alle resultater av oppgaven, skapt av studenten alene gjennom oppgavearbeidet, eies av studenten med de begrensninger som følger av punkt 5, 6 og 7 nedenfor. Eiendomsretten til resultatene overføres til ekstern virksomhet hvis punkt 5 b er avkrysset eller for tilfelle som i punkt 6.

I henhold til lov om opphavsrett til åndsverk beholder alltid studenten de ideelle rettigheter til eget åndsverk, dvs. retten til navngivelse og vern mot krenkende bruk.

Studenten har rett til å inngå egen avtale med NTNU om publisering av sin oppgave i NTNUs institusjonelle arkiv på Internett. Studenten har også rett til å publisere oppgaven eller deler av den i andre sammenhenger dersom det ikke i denne avtalen er avtalt begrensninger i adgangen til å publisere, jf. punkt 8.

5. Den eksterne virksomheten sine rettigheter

Der oppgaven bygger på, eller videreutvikler materiale og/eller metoder (prosjektbakgrunn) som eies av den eksterne, eies prosjektbakgrunnen fortsatt av den eksterne. Hvis studenten skal utnytte resultater som inkluderer den eksterne sin prosjektbakgrunn, forutsetter dette at det er inngått egen avtale om dette mellom studenten og den eksterne virksomheten.

¹ Jf. Lov om opphavsrett til åndsverk mv. av 15.06.2018 § 1

Hovedregel

<input checked="" type="checkbox"/>	Ekstern virksomhet skal ha bruksrett til resultatene av oppgaven
-------------------------------------	--

Dette innebærer at ekstern virksomhet skal ha rett til å benytte resultatene av oppgaven i egen virksomhet. Retten er ikke-eksklusiv.

6. Godtgjøring ved patenterbare oppfinnelser

Dersom studenten i forbindelse med utførelsen av oppgaven har nådd frem til en patenterbar oppfinnelse, enten alene eller sammen med andre, kan den eksterne kreve retten til oppfinnelsen overført til seg. Dette forutsetter at utnyttelsen av oppfinnelsen faller inn under den eksterne sitt virksomhetsområde. I så fall har studenten krav på rimelig godtgjøring. Godtgjøringen skal fastsettes i samsvar med arbeidstakeroppfinnelsesloven § 7. Fristbestemmelsene i § 7 gis tilsvarende anvendelse.

7. NTNU sine rettigheter

De innleverte filer av oppgaven med vedlegg, som er nødvendig for sensur og arkivering ved NTNU, tilhører NTNU. NTNU får en vederlagsfri bruksrett til resultatene av oppgaven, inkludert vedlegg til denne, og kan benytte dette til undervisnings- og forskningsformål med de eventuelle begrensninger som fremgår i punkt 8.

8. Utsatt offentlighet

Hovedregelen er at studentoppgaver skal være offentlige. I særlige tilfeller kan partene bli enige om at hele eller deler av oppgaven skal være undergitt utsatt offentlighet i maksimalt tre år. Hvis oppgaven unntas fra offentlighet, vil den kun være tilgjengelig for student, ekstern virksomhet og veileder i denne perioden. Sensurkomiteen vil ha tilgang til oppgaven i forbindelse med sensur. Student, veileder og sensorer har taushetsplikt om innhold som er unntatt offentlighet.

Oppgaven skal ikke være unntatt offentlighet (sett kryss)	<input checked="" type="checkbox"/>
---	-------------------------------------

Dersom partene, etter at oppgaven er ferdig, blir enig om at det ikke er behov for utsatt offentlighet, kan dette endres. I så fall skal dette avtales skriftlig.

Vedlegg til oppgaven kan unntas ut over tre år etter forespørsel fra ekstern virksomhet. NTNU og student skal godta dette hvis den eksterne har saklig grunn for å be om at et eller flere vedlegg unntas.

De delene av oppgaven som ikke er undergitt utsatt offentliggjøring, kan publiseres i NTNUs institusjonelle arkiv, jf punkt 4, siste avsnitt. Selv om oppgaven er undergitt utsatt offentlighet, skal ekstern virksomhet legge til rette for at studenten kan benytte hele eller deler av oppgaven i forbindelse med jobbsøknader samt videreføring i et master- eller doktorgradsarbeid.


9. Generelt

Denne avtalen skal ha gyldighet foran andre avtaler som er eller blir opprettet mellom to av partene som er nevnt ovenfor. Dersom student og ekstern virksomhet skal inngå avtale om konfidensialitet om det som studenten får kjennskap til i eller gjennom den eksterne virksomheten, kan NTNUs standardmal for konfidensialitetsavtale benyttes. Den eksterne sin egen konfidensialitetsavtale, eventuell konfidensialitetsavtale den eksterne har inngått i samarbeidprosjekter, kan også brukes forutsatt at den ikke inneholder punkter i motstrid med denne avtalen (om rettigheter, offentliggjøring mm). Dersom det likevel viser seg at det er motstrid, skal NTNUs standardavtale om utføring av studentoppgave gå foran. Eventuell avtale om konfidensialitet skal vedlegges denne avtalen.

Eventuell uenighet som følge av denne avtalen skal søkes løst ved forhandlinger. Hvis dette ikke fører frem, er partene enige om at tvisten avgjøres ved voldgift i henhold til norsk lov. Tvisten avgjøres av sorenskriveren ved Sør-Trøndelag tingrett eller den han/hun oppnevner.

Denne avtale er signert i fire eksemplarer hvor partene skal ha hvert sitt eksemplar. Avtalen er gyldig når den er godkjent og underskrevet av NTNU v/instituttleder.

Signaturer:

Instituttleder Dato: 11/5-2022	
Veileder ved NTNU Dato: 22.04.2022	Thomas Haavi
Student Dato: 10.02.2022	Jonas Veie Daling

11. Arbeidspakker

Arbeidspakke 1

Fag: MASG2900 Bacheloroppgave - Industriell design	Dato: 12.02.22	
Prosjekt: Hydrogen som energibærer innen fornybar energiproduksjon.		
Aktivitet: Forprosjekt	Aktivitet nr.: 1	
Start: 15.01.22	Slutt: 15.02.22	
Foregående aktiviteter: Ingen		
Etterfølgende aktiviteter: Planlegge solcelleareal og vindmølle størrelse.		
Arbeidsbeskrivelse: Utføre et mer generelt litteraturstudie omkring vindkraft, solceller, elektrolysemaskiner og brenselcelle. Bestemme problemstilling basert på fakta funnet i studiet.		
Mål: Definere problemstilling.	Antall timeverk: 75 Jonas Veie Daling	Fordeling: 100 %
Faglig ansvarlig: Jonas Veie Daling		
Prosjektmedarbeidere: Jonas Veie Daling tlf. +47 94 88 82 70 e-post: jonasvd@ntnu.no		

Arbeidspakke 2

Fag: MASG2900 Bacheloroppgave - Industriell design	Dato: 12.02.22	
Prosjekt: Hydrogen som energibærer innen fornybar energiproduksjon.		
Aktivitet: Besøk anlegg	Aktivitet nr.: 2	
Start: 14.02.22	Slutt: 20.02.22	
Foregående aktiviteter: Forprosjekt		
Etterfølgende aktiviteter: Sammenligne problemstilling opp mot kunnskap fra besøk på anlegg.		
Arbeidsbeskrivelse: Besøke anlegg som bruker hydrogen som energibærer. Legge frem problemstilling til TrønderEnergi.		
Mål: Få kunnskap rundt hydrogen som energibærer og skape en god relasjon til TrønderEnergi.	Antall timeverk: 75 Jonas Veie Daling	Fordeling: 100 %
Faglig ansvarlig: Jonas Veie Daling		
Prosjektmedarbeidere: Jonas Veie Daling tlf. +47 94 88 82 70 e-post: jonasvd@ntnu.no		

Arbeidspakke 3

Fag: MASG2900 Bacheloroppgave - Industriell design	Dato: 12.02.22	
Prosjekt: Hydrogen som energibærer innen fornybar energiproduksjon.		
Aktivitet: Analyse	Aktivitet nr.: 3	
Start: 15.02.22	Slutt: 15.03.22	
Foregående aktiviteter: Innhenting av data knyttet til fornybar energiproduksjon		
Etterfølgende aktiviteter: Lage grafer og tabeller til resultater.		
Arbeidsbeskrivelse: Simulere energiproduksjon i anlegg ved bruk av solceller og vindmøller.		
Mål: Finne data som kan brukes til å sammenligne lønnsomhet ved bruk av hydrogen som energibærer.	Antall timeverk: 100 Jonas Veie Daling	Fordeling: 100 %
Faglig ansvarlig: Jonas Veie Daling		
Prosjektmedarbeidere: Jonas Veie Daling tlf. +47 94 88 82 70 e-post: jonasvd@ntnu.no		

Arbeidspakke 4

Fag: MASG2900 Bacheloroppgave - Industriell design	Dato: 12.02.22	
Prosjekt: Hydrogen som energibærer innen fornybar energiproduksjon.		
Aktivitet: Sluttrapport	Aktivitet nr.: 4	
Start: 15.03.22	Slutt: 20.05.22	
Foregående aktiviteter: Analyse av energiproduksjon, undersøkelse av potensialet til hydrogen som energibærer.		
Etterfølgende aktiviteter: Skrive sluttrapport.		
Arbeidsbeskrivelse: Basert på tidligere undersøkelser, skrive sluttrapport med vekt på sammenligning av anlegg, størrelse anlegg, effektivitet, kostnadsperspektiv og sammenligning ved eksisterende energitilførsel kontra bruk av fornybar energiproduksjon med hydrogen som energibærer.		
Mål: Skrive ferdig sluttrapport.	Antall timeverk: 300 Jonas Veie Daling	Fordeling: 100 %
Faglig ansvarlig: Jonas Veie Daling		
Prosjektmedarbeidere: Jonas Veie Daling tlf. +47 94 88 82 70 e-post: jonasvd@ntnu.no		

Litteraturliste forprosjekt

- NTNU (2022) *Rapportskriving*. Tilgjengelig fra: <https://www.ntnu.no/kt/studier/rapport> (Hentet: 20. januar 2022).
- Microsoft (2022) *Presentere data I et Gantt-diagram i Excel*. Tilgjengelig fra: <https://support.microsoft.com/nb-no/office/presentere-data-i-et-gantt-diagram-i-excel-f8910ab4-ceda-4521-8207-f0fb34d9e2b6> (Hentet: 05.februar 2022).
- Intrum (2022) *Slik setter du opp et budsjett som funker*. Tilgjengelig fra: <https://www.intrum.no/kundeservice/tips-til-bedre-okonomi/artikler/slik-setter-du-opp-et-budsjett/> (Hentet: 04.02.2022)
- Store Norske Leksikon (2022) *Arbeidspakke*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/arbeidspakke> (Hentet: 08. februar 2022).
- Innovasjon Norge (2022) *Forstudie*. Tilgjengelig fra: <https://www.innovasjon norge.no/no/tjenester/innovasjon-og-utvikling/finansiering-for-innovasjon-og-utvikling/forstudie/> (Hentet: 15 januar 2022).