

Kristin Iversen  
Tor Martin Flø Gustad  
Ole-André Tunheim Strømsheim  
Christian Bjøntegaard

## Design av hybridkraftverk -

Elvekraft, solkraft og vindkraft i samme elektriske infrastruktur

Bacheloroppgave i Elkraft og bærekraftig energi, Elektroingeniør  
Veileder: Karen Byskov Lindberg  
Mai 2023



Kristin Iversen  
Tor Martin Flø Gustad  
Ole-André Tunheim Strømsheim  
Christian Bjøntegaard

## **Design av hybridkraftverk -**

Elvekraft, solkraft og vindkraft i samme elektriske infrastruktur



Bacheloroppgave i Elkraft og bærekraftig energi, Elektroingeniør  
Veileder: Karen Byskov Lindberg  
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk  
Institutt for elkraftteknikk



Kunnskap for en bedre verden



**KANDIDATER (etternavn, fornavn):**

Iversen, Kristin

Gustad, Tor Martin Flø

Strømsheim, Ole-André Tunheim

Bjøntegaard, Christian

<b>DATO:</b> 22.05.23	<b>INSTITUTT:</b> Institutt for elektrisk energi	<b>PROSJEKT NR:</b> E2328	<b>SIDER/VEDLEGG:</b> 79/ 10
--------------------------	---	------------------------------	---------------------------------

**Oppdragsgiver:**

Aneo ved Beate Nesje, beate.nesje@aneo.com, 91186823

**Veileder NTNU:**

Karen Byskov Lindberg, karen.lindberg@ntnu.no, 99604272

**TITTEL:**

Design av hybridkraftverk - Elvekraft, solkraft og vindkraft i samme elektriske infrastruktur

**SAMMENDRAG:**

Denne bacheloroppgaven undersøker samspillet mellom tre typer uregulerbar kraft; vind-, sol- og elvekraft. Målet er å evaluere egnetheten for samproduksjon og forstå hvordan disse kraftkildene kan komplementere hverandre.

Oppgaven tar utgangspunkt i to kraftverk i Selbu kommune: Stokkfjellet vindpark og Mølnåa elvekraftverk. I tillegg er det simulert et solcelleanlegg på Stokkfjellet for å utforske mulighetene rundt hybridkraftverk.

Timeseriedata for produksjonen fra 2022 er analysert. Datasettverdiene er for å simulere produksjon i kraftverk av ulike størrelser og dermed muliggjøre sammenligning av flere kraftsammensetninger. Dataanalysene for denne oppgaven er utført ved hjelp av Excel og Python.

Analysen er delt inn i to hoveddeler: en generell analyse og en case-studie av Stokkfjellet vindpark.

I generell analyse vurderes ulike sammensetninger av vind-, sol- og elvekraft, produksjonsalternativ (PA), som i sum blir 150 MW. PA blir vurdert mot hverandre for å undersøke hvilket alternativ som gir høyest og jevnest samproduksjon når alle tre kraftverk tas i betraktning. Det blir funnet at PA 5C gir jevnest produksjonskurve, høyest årlig produksjon og kapasitetsfaktor.

Case-studie Stokkfjellet undersøker hvor stort et solkraftverk installert sammen med Stokkfjellet vindpark kan være, gitt at den begrensende faktoren er krafttransformatoren på Stokkfjellet. Det ble det funnet at man kan installere opptil 30 MW solkraft før merkbare produksjonstap forekommer.

**CANDIDATES (last name, first name):**

Iversen, Kristin

Gustad, Tor Martin Flø

Strømsheim, Ole-André Tunheim

Bjøntegaard, Christian

<b>DATE:</b> 22.05.23	<b>DEPARTMENT:</b> Department of Electric Energy	<b>PROJECT NR:</b> E2328	<b>PAGES/APPENDIX:</b> 79/ 10
--------------------------	--	-----------------------------	----------------------------------

**Client/External supervisor:**

Aneo / Beate Nesje, beate.nesje@aneo.com, 91186823

**Supervisor NTNU:**

Karen Byskov Lindberg, karen.lindberg@ntnu.no, 99604272

**TITLE:**

Design of hybrid power plants - Run-off-river hydro power, solar power and wind power in the same electrical infrastructure

**ABSTRACT:**

This bachelor's dissertation explores the interaction between three types of uncontrollable power: wind, solar, and run-off-river power. The aim is to assess their suitability for co-production and understand how these power sources can complement each other. The study is based on two power plants in Selbu municipality: the Stokkfjellet wind farm and the Mølnåa run-off-river power station. Furthermore, a solar panel facility on Stokkfjellet has been simulated to explore the potential for a hybrid power plant. Time-series data from the year 2022 has been analysed. The dataset values simulate production in power plants of various sizes, thus enabling comparison of multiple power compositions. The data analysis for this dissertation has been carried out using Excel and Python.

The analysis is divided into two main parts: a general analysis and a case study of the Stokkfjellet wind farm.

In the general analysis, various combinations of wind, solar, and run-off-river power, referred to as production alternatives (PA), totalling 150 MW are evaluated against each other to determine which option yields the highest and most stable co-production when all three power plants are considered. It was found that PA 5C provides the smoothest production curve and the highest annual production and capacity factor.

The Stokkfjellet case study investigates how large a solar power plant installed alongside the Stokkfjellet wind farm could be, given that the limiting factor is the power transformer at Stokkfjellet. It was found that up to 30 MW of solar power can be installed before noticeable production losses occur.

# Forord

Bacheloroppgaven er det avsluttende prosjektet i sjette og siste semester ved studiet Bachelor i ingeniørfag, elektro ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Gruppen består av 4 studenter som har spesialisert seg innen retningen elkraft og bærekraftig energi. Prosjektarbeidet som gjennomføres tilsvarer 20 studiepoeng og har et forventet arbeidsomfang på ca 550-600 timer pr student.

Arbeidet med denne rapporten har resultert i dypere kunnskap ved prosjektering av bærekraftige energiløsninger og integreringen av fornybare energikilder til strømmettet. Oppgaven er gitt av Aneo. Som oppdragsgiver har Aneo fokus på å bruke energi smartere, energieffektivisering og øke produksjonen av fornybar energi. Oppgaven har hatt fokus på produksjon ved samhandling mellom flere ulike kraftverk, og arbeidet med rapporten har resultert i bedre kunnskap om uregulerbare kraftverk og deres produksjonsmønstre.

Vi vil takke vår veileder Karen Byskov Lindberg v/NTNU som har bidratt med gode råd, tilbakemeldinger og kunnskap.

Takk til vår kontaktperson Beate Nesje ved Aneo for god veiledning og alle informasjonsbidrag gjennom prosjektperioden. Fra Aneo vil vi også takke Bjørn Thorud for informasjon om solkraftverk, Anders Fjeldberg Teigmoen for opplæring i simuleringsprogrammet PVsyst og Geir Ove Lillebudal for omvisning på Stokkfjellet.

Takk til Jan Ove Uthus ved Selbu Energiverk for god informasjon og raske tilbakemeldinger om elvekraftverk, og omvisning på Mølnåa. Videre vil vi takke Tensio, NVE, Torgeir Kulseth, Siemens Energy og EB Electric for god hjelp og informasjon.

Ved NTNU vil vi takke professor emeritus Kjell Sand og universitetslektor Tor Arne Folkestad for god veiledning innenfor tema krafttransformator.

Gruppen har fremstilt en faglig rapport som tar for seg sammensetning av uregulerbar kraft i samme elektriske infrastruktur.

Trondheim 22.05.23

Kristin Iversen

Kristin Iversen

Ole-André Tunheim Strømsheim

Ole-André T. Strømsheim

Tor Martin Flø Gustad

Tor Martin F. Gustad

Christian Bjøntegaard

Christian Bjøntegaard

# Innholdsfortegnelse

<b>Begrep og forkortelser</b>	<b>VI</b>
<b>Enhetsliste</b>	<b>VII</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Problemstilling . . . . .	1
1.3 Avgrensning av oppgaven . . . . .	2
1.4 Resultatmål . . . . .	2
1.5 Prosessmål . . . . .	2
<b>2 Teori</b>	<b>4</b>
2.1 Uregulerbare kraftverk . . . . .	4
2.1.1 Produksjonssikkerhet . . . . .	4
2.2 Vindkraft . . . . .	5
2.3 Solkraft . . . . .	7
2.4 Elvekraft . . . . .	11
2.5 Kapasitetsfaktor kraftverk . . . . .	15
2.6 Krafttransformator . . . . .	15
2.7 Dimensjonering av transformator . . . . .	17
2.7.1 Tomgangs- og belastningstap . . . . .	17
2.7.2 Levetid . . . . .	18
2.7.3 Bryteranlegg . . . . .	18
2.8 Beregning av annuitetsfaktor . . . . .	20
2.9 Digitale verktøy . . . . .	20
<b>3 Data</b>	<b>22</b>
3.1 Datainnsamling . . . . .	22
3.2 Strømpriser . . . . .	23
3.3 Vindkraftverk . . . . .	23
3.4 Solkraftverk . . . . .	23
3.5 Elvekraftverk . . . . .	24
3.6 Effektflyt og forbruk . . . . .	24
3.7 Værdata . . . . .	24
3.8 Simulering av solproduksjon i PVsyst . . . . .	24
<b>4 Metode</b>	<b>27</b>
4.1 Generell analyse . . . . .	27
4.1.1 Generell analyse - forbedret alternativ . . . . .	28
4.1.2 Kostnad for transformator vs. inntekt fra kraftsalg . . . . .	29
4.2 Case-studie Stokkfjellet - produksjonsalternativer . . . . .	30
4.3 Databehandling i Excel og Python . . . . .	32
<b>5 Case-studie</b>	<b>33</b>
5.1 Stokkfjellet vindpark . . . . .	33



5.2	Vindkraft - analyse . . . . .	34
5.3	Solkraft på Stokkfjellet . . . . .	36
5.4	Solkraftverk - analyse . . . . .	36
5.5	Mølnåa elvekraftverk . . . . .	41
5.6	Elvekraft - analyse . . . . .	42
5.7	Nettstruktur . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Resultater generell analyse</b>	<b>47</b>
6.1	Kostnad for transformator mot inntekt fra kraftsalg . . . . .	53
6.2	Generell analyse - forbedring av PA 5 . . . . .	54
6.2.1	Oversikt produksjonstimer . . . . .	56
6.2.2	Oversikt produksjon årstider . . . . .	57
6.2.3	Transformatorvalg . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Resultater case-studie Stokkfjellet</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>61</b>
8.1	Usikkerhet dataanalyse . . . . .	61
8.2	Validitet og pålitelighet . . . . .	62
8.3	Etikk . . . . .	62
<b>9</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>64</b>
10.1	Generell analyse . . . . .	64
10.2	Case-studie Stokkfjellet . . . . .	64
<b>11</b>	<b>Referanser</b>	<b>65</b>
<b>12</b>	<b>Vedlegg</b>	<b>70</b>
12.1	Produksjonsalternativer fra case-studie Stokkfjellet . . . . .	70
12.2	Kodesnutt databehandling . . . . .	71
12.3	Kodesnutt plotting . . . . .	74

## Figurliste

1	Vindturbiner på Stokkfjellet. . . . .	5
2	Historisk utvikling av installert effekt for vindkraftverk [15]. . . . .	6
3	Sveipeareal for vindturbin [17]. . . . .	7
4	Oppbygging av solceller [21]. . . . .	8
5	Seriekobling av solcellepaneler [23]. . . . .	8
6	Historisk utvikling av installert effekt for solkraft [26]. . . . .	10
7	Skjematisk tegning av prinsippet bak vannkraft [34]. . . . .	12
8	Prinsippskisse av generator og turbin [34]. . . . .	13
9	Coanda-inntak [38]. . . . .	14
10	Skisse over prinsippet med Coanda-effekt inntaksrist [37]. . . . .	14
11	Krafttransformator på Stokkfjellet. . . . .	16
12	GIS - gassisolert bryteranlegg, foto: Fredrik Ringe/Lyse Konsern. . . . .	19
13	AIS - luftisolert bryteranlegg, foto: Peter Tubaas/ABB. . . . .	19
14	132 kV delen av innendørs AIS-bryteranlegg på Stokkfjellet. . . . .	19
15	Oppsett av solcellepanel med avstand mellom hver rekke og høyde over bakken . . . . .	26
16	Generell analyse med teoretisk skalering av alle kraftverk . . . . .	27
17	Case-studie Stokkfjellet med teoretisk skalering av solkraft . . . . .	31
18	Vindturbinparken på Stokkfjellet, skjermutklipp fra NVE Atlas . . . . .	34
19	Vindturbiner på Stokkfjellet, foto: TrønderEnergi . . . . .	34
20	Graf produksjon vindkraftverk 88,2MW mot pris(2022) . . . . .	35
21	Vind i Selbu år 2022 sammenstilt med vindkraftproduksjon [69]. . . . .	35
22	Oppsett av produksjon for 2 MW anlegg . . . . .	36
23	Illustrasjon av 2 MW solcelleanlegg på Stokkfjellet. . . . .	37
24	Hovedresultater fra PVsyst etter simulering av 2 MW solcelleanlegg . . . . .	38
25	Produksjon fra solcelleanlegg med 2 MW installert effekt (Simulert i PVsyst) mot pris for NO3 (2022) . . . . .	38
26	Produksjon fra solcelleanlegg mot målte soltimer . . . . .	39
27	Oppsett av produksjon for 50 MW anlegg . . . . .	39
28	Illustrasjon av 50 MW solcelleanlegg på Stokkfjellet. . . . .	40
29	Hovedresultater fra PVsyst etter simulering av 50 MW solcelleanlegg . . . . .	40
30	Generatoren i Mølnåa kraftverk. . . . .	41
31	Mølnåa elvekraftverk i Selbu [73]. . . . .	42
32	Produksjon fra Mølnåa elvekraftverk mot prissone NO3 . . . . .	43
33	Produksjon og temperatur i Selbu. [69] . . . . .	43
34	Produksjon fra Mølnåa elvekraftverk mot nedbør og smømengde i Selbu[69] . . . . .	44
35	Oversiktsbilde hentet fra NVE Atlas . . . . .	46
36	Forenklet enlinjeskjema 150 MW installert effekt . . . . .	47
37	Varighetskurve for produksjonen for PA 1 til 7. . . . .	49
38	Årsproduksjon med installert effekt og transformatorstørrelse for hvert produksjonsalternativ . . . . .	49
39	Produksjon for PA 1 til 7 . . . . .	50
40	Generell analyse - Netto overskudd og traføytelse for PA 1 til 7. . . . .	53
41	Nøkkeltall for generell analyse . . . . .	53
42	Varighetskurve for produksjonen for produksjonsalternativ 5 . . . . .	54

---

43	Produksjon for produksjonsalternativ 5A, 5B og 5C . . . . .	55
44	Produksjonstimer for ulike produksjonsintervall . . . . .	56
45	Månedlig produksjon fordelt på vind-, sol- og elvekraft. . . . .	57
46	Produksjon, trafokostnad, kapasitetsfaktor, netto overskudd og trafoytelse for kraftverkene . . . . .	58
47	Produksjonsalternativ med økende andel solkraft. Produksjon, strupn- ingstap og inntekt for hvert produksjonsalternativ. . . . .	59
48	Varighetskurve for fire av produksjonsalternativene. . . . .	60

## Tabelliste

1	Fordeler og ulemper med luftisolerte og gassisolerte anlegg . . . . .	18
2	Oversikt over datasett som er benyttet for prosjektoppgaven . . . . .	22
3	Strømpriser i øre/kWh for NO3 inkl mva . . . . .	23
4	Parameter brukt i PVsyst . . . . .	25
5	Parameter brukt i PVsyst . . . . .	26
6	Prinsippskisse for valg av høye og lave størrelser i PA 1 til 7 . . . . .	28
7	Produksjonsalternativer generell analyse . . . . .	28
8	Størrelser i PA 5 A, B og C . . . . .	29
9	Installert effekt for produksjonsalternativer i case-studie Stokkfjellet . . . . .	31
10	Data om vindturbinparken på Stokkfjellet . . . . .	33
11	Data om elvekraftverket Mølnåa . . . . .	42
12	Produksjon i Mølnåa kraftverk for de siste 3 årene . . . . .	45
13	Produksjonsalternativer årsproduksjon og kapasitetsfaktor . . . . .	47
14	Produksjonsalternativer årsproduksjon og kapasitetsfaktor forbedring av PA 5 . . . . .	54
15	PA og resultat fra case-studie Stokkfjellet . . . . .	70

## Begrep og forkortelser

AI	Artificial Intelligence - kunstig intelligens.
AIS	Luftisolert bryteranlegg
Cut-off	Tidspunkt når vindturbin stenges for produksjon. Det kan være på grunn av for sterk vind eller av økonomiske årsaker.
Distribusjonsnett	Kraftnett som overfører elektrisk energi til sluttbruker. Kan deles i to, høyspent distribusjonsnett (normalt spenningsnivå 11 kV - 22 kV) og lavspent distribusjonsnett (normalt spenningsnivå 230 V - 400 V)
GIS	Gassisolert bryteranlegg
"Hot-spot"	Termisk levetid og aldringen av isolasjonen i en transformator er bestemt av gjennomsnittstemperaturen i det varmeste punktet.
Inverter	Endrer likespenning (DC) om til vekselspanning (AC)
Middelproduksjon	Gjennomsnittlig årsproduksjon
NetBas	GIS- basert nettinformasjonssystem for planlegging, analyse- og simuleringverktøy for kraftsystem
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
PA	Produksjonsalternativer.
Regionalnett	Kraftnett som dekker større områder(fylker eller regioner), normalt spenningsnivå 66 kV - 132 kV. Overgangen mellom sentralnett og distribusjonsnett
Sentralnett	Også kalt transmisjonsnett. Hovednettet av overføringslinjer i Norge. Driftes hovedsaklig av Statnett, spenningsnivå 132 kV - 420 kV.
Strupningstap	Produksjon som må strupes da det overgår transformatorytelsen

## Enhetsliste

1 mål 1000  $m^2$ .

E Energy. Årsproduksjon av effekt - måles i Wh/år

G Giga. SI-enhet som tilsvarer  $10^9$  - Milliard

k Kapasitetsfaktor. Teoretisk produksjonspotensiale over en tidsperiode

kWh Kilowatttime, tilsvarer energien som en effekt på en kilowatt utvikler i løpet av en time.

M Mega. SI-enhet som tilsvarer  $10^6$  - Million

P Power. Installert effekt - måles i Watt

s Sekund. SI-enhet som tilsvarer tid.

T Terra. SI-enhet som tilsvarer  $10^{12}$  - Billion

VA Voltampere. Måleenhet for en tilsynelatende effekt i vekselstrømkretser.

W Watt. Måleenhet for effekt som tilsvarer en Joule per sekund.

Wh Watttime. Tilsvarer energien som en effekt på en Watt utvikler i løpet av en time.

Wp Watt peak, beskriver merkeeffekten til solkraftanlegg under standard testforhold ved en gitt solinnstråling

# 1 Innledning

Overgangen til fornybar energi har blitt et viktig tema i kampen mot klimaendringer og reduksjon av klimautslipp. Fornybare energikilder, som vind-, sol- og elvekraft, har vokst betydelig de siste årene, men de har også noen utfordringer knyttet til uregulerbarhet. Uregulerbar kraftproduksjon kan skape ubalanse i energisystemet og øke risikoen for strømbrudd [1]. Denne bacheloroppgaven vil undersøke utfordringene og mulighetene ved uregulerbar kraftproduksjon nærmere, og hvor forsyningssikkert samspillet mellom disse vil være.

## 1.1 Bakgrunn

Den 1.februar 2023 ble Energikommisjonens rapport levert til olje- og energiministeren. Oppdraget var blant annet å kartlegge hvordan Norge kan fortsette å sikre overskuddsproduksjon av kraft og at rikelig med tilgang til fornybar kraft skal gi et fortrinn for norsk industri. Konklusjon var at for å kunne nå klima- og industripolitiske mål, så trengs det ekstraordinære tiltak for å bygge ut nok kraft. Og ved utbygging av kraftproduksjon vil et allerede underdimensjonert nett skape utfordringer, i sær transmisjonsnettet [2].

Et flertall i Energikommisjonen mener at gjeldene nettregulering i større grad må få insentiver til utbygging, og at nettstrukturen må bygges ut i forkant istedet for i etterkant. En utbygging av kraftnettet vil være tidkrevende, og med store industrietableringer og klimatiltak. Det bør undersøkes hvilke løsninger med økt kraftproduksjon av fornybar energi som kan gjennomføres [2].

Samfunnsmålet for prosjektet er å undersøke hvordan samspillet mellom uregulerbar kraft i form av vind-, sol- og elvekraft kan være med og til sammen gi en stabil produksjon av elektrisitet, med dagens reelle begrensninger i kraftnettet.

## 1.2 Problemstilling

Oppgavens oppdragsgiver Aneo har som mål å bidra med fornybar kraftutbygging, elektrifisering og energieffektivisering som vil være lønnsom for samfunn, kunder og eiere. Aneos ambisjon er å øke produksjon fra vind- og solkraft i Norden opptil 12 TWh innen år 2030 [3]. De har i den sammenheng begynt å undersøke mulighetene for hybride energiparker bestående av sol og vindkraft. På det kontinentale Europa har man erfart at disse to energikildene gjerne produserer på motsatt tid av hverandre og at de dermed kan utnytte hverandre på en god måte [4].

Hensikten med denne oppgaven er å vurdere fordeler og ulemper med en hybridpark bestående av tre uregulerbare kraftverk, og i hvilken grad produksjon fra vindkraft,

solkraft og elvekraft samspiller og er i motfase. Det blir undersøkt hvordan en samspillende kraftproduksjon blir i forhold til ytelse på krafttransformator.

Lokasjon for prosjektet er i Selbu kommune, med utgangspunkt i Stokkfjellet vindpark og elvekraftverket Mølnåa kraftverk. Aneo har ambisjoner om å bygge solkraftverk i tilknytning til vindparken.

For denne oppgaven er det to forskjellige problemstillinger som undersøkes. Generell analyse vil undersøke hvor jevn og høy produksjon et hybridkraftverk med vind, sol og elv kan oppnå, og hvor stor en felles krafttransformator må være. Case-studiet Stokkfjellet undersøker hvor mye solkraft som kan installeres sammen med Stokkfjellet vindpark, uten investering av ny krafttransformator.

### 1.3 Avgrensning av oppgaven

Det blir ikke beregnet tap på krafttransformatorer for denne oppgaven. Ved kostnadsanalyse blir kun investeringskostnad for transformator inkludert.

Gruppen har ikke tilgang på NetBas og har derfor ikke hatt muligheten til å gjøre lastflytberegning for denne oppgaven.

### 1.4 Resultatmål

Målet er å undersøke hvor jevn og høy en samlet kraftproduksjon fra et hybridkraftverk med vindkraft, solkraft og elvekraft kan bli.

En generell analyse vil undersøke forskjellige alternativ av sammensetning av installert effekt på alle tre kraftverk, og hvor stor en felles krafttransformator må være for å ta imot produksjonen.

En case-studie av Stokkfjellet vil undersøke mulighetene for økning av kraftproduksjon innenfor eksisterende krafttransformators ytelse, ved å montere et solkraftverk sammen med vindkraftverket.

### 1.5 Prosessmål

Prosjektet deles inn i tre ansvarsområder, vind-, sol- og elvekraft. Det gjøres undersøkelser og informasjonsinnhenting for å bedre kunne forstå samspillet mellom teknologiene.

For å oppnå et godt resultat jobbes det for å skape godt samarbeid både eksternt og internt. Det er ønskelig med godt samarbeid med Aneo for å diskutere problemstillingen og oppgavens retning i store trekk. Det er ønskelig med godt samarbeid med veileder



fra NTNU for å få råd om oppgavens vinkling mot problemstillingen, databehandling og formidling av resultat. For å sikre godt samarbeid i bachelorgruppen planlegges det å sitte samlet på bachelorrommet, for å forenkle kommunikasjonen og skape en god arena for diskusjon og drøfting.

Det jobbes for å ha en tydelig og profesjonell kommunikasjon ut til eksterne kontaktpersoner.

## 2 Teori

Dette kapittelet tar for seg teori om de tre uregulerbare kraftverkene som undersøkes.

### 2.1 Uregulerbare kraftverk

Uregulerbare kraftverk er kraftverk som ikke kan justere kraftproduksjonen sin for å møte etterspørselen i sanntid. Dette står i motsetning til regulerbare kraftverk, som kan justere produksjonen sin i henhold til behovet for kraft i sanntid. Uregulerbar produksjon er mer uavhengig av pris [5].

De vanligste eksemplene på uregulerbar kraft er vind-, sol- og elvekraftverk. Produksjonen til disse kraftverkene avhenger av værforholdene og vil derfor variere i løpet av dagen, ukene og årstidene. Dette kan føre til at det produseres mer kraft enn hva som er nødvendig på et gitt tidspunkt, eller at det ikke produseres nok kraft når etterspørselen er høy [6][7].

Uregulerbare kraftverk kan være en utfordring for energisystemer som er avhengige av stabil og pålitelig krafttilførsel. For å håndtere denne utfordringen, er det viktig å ha en balanseringsmekanisme som kan utjevne tilbud og etterspørsel av kraft i sanntid. Dette kan omfatte bruk av energilagringsteknologi, slik som batterier og pumpekraftverk [8], eller bruk av andre typer kraftproduksjon som kan justeres i sanntid, for eksempel magasinkraftverk gasskraftverk eller kjernekraftverk [5].

Til tross for disse utfordringene, har uregulerbare kraftverk en viktig rolle å spille i overgangen til en mer bærekraftig energiproduksjon. Vind-, sol- og elvekraftverk er fornybare og utslippsfrie kilder til energi, og ved hjelp av riktig planlegging og styring kan de være en pålitelig og kostnadseffektiv del av energimiksen [9].

#### 2.1.1 Produksjonssikkerhet

For uregulerbar kraft vil det være viktig å se hvor mye som kan produseres i sanntid. Produksjonssikkerheten for uregulerbare kraftverk avhenger av flere faktorer. Disse faktorene inkluderer teknologien som brukes, vedlikehold- og driftsprosedurene, samt vær- og miljøforholdene i området der kraftverket er lokalisert [9].

Uregulerbare kraftverk har ofte lavere produksjonssikkerhet enn regulerte kraftverk, hovedsakelig fordi de er avhengige av vær- og klimaforholdene i området. Vindkraftverk er avhengige av tilstrekkelige vindforhold, solkraftverk er avhengige av tilstrekkelig sollys og elvekraftverk er avhengig av nedbør. Disse faktorene kan variere mye fra dag til dag og kan være vanskelig å forutse [9].

Likevel har teknologiske fremskritt og økt erfaring med drift og vedlikehold av uregulerbare kraftverk, ført til betydelige forbedringer i produksjonssikkerheten. Moderne vindkraftverk kan for eksempel overvåke vindforholdene og tilpasse seg endringene i sanntid for å optimalisere produksjonen [10]. Solkraftverk kan optimalisere produksjonen ved å bruke sporingsystemer som justerer solcellepanelene i henhold til solens posisjon på himmelen [11].

Til tross for disse forbedringene vil uregulerbare kraftverk fortsatt ha lavere produksjonssikkerhet enn regulerte kraftverk. Derfor er det viktig å ha andre former for kraftproduksjon som kan trå til når værforholdene ikke er optimale [9].

Produksjonssikkerhet ikke er den eneste faktoren som påvirker valget av energikilde. Andre faktorer som kostnadseffektivitet, tilgjengelighet og bærekraft bør vurderes når man velger en energikilde.

Det er en fordel å ha en balansert energimiks som inkluderer både uregulerbare og regulerte kraftverk for å sikre en pålitelig og bærekraftig energiforsyning [9].

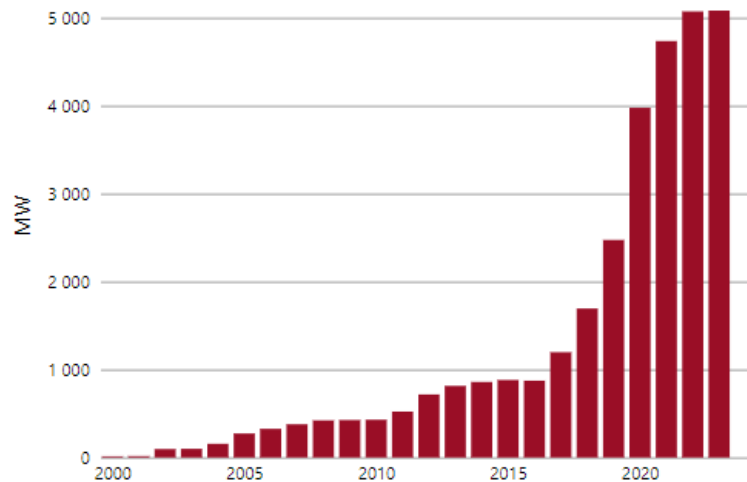
## 2.2 Vindkraft

Vindkraftverk er kraftverk som kan omdanne den kinetiske energien i vind til elektrisk energi. Dette er et kraftverk bestående av en eller flere vindturbiner. En vindturbin består av en aksel med som oftest tre rotorblader. På toppen er det et maskinhus som vrir turbinen slik at rotorbladene roterer i et plan loddrett på vindretningen. Hovedkomponentene i maskinhuset er gir, generator, brems, dreiemotor og kontrollsystem. Vindenergien genereres til elektrisk energi i generatoren og blir ført til en transformator i vindturbinen som omformer spenningen [12].



Figur 1: Vindturbiner på Stokkfjellet.

I Norge er det montert 65 vindkraftverk med 1392 turbiner, og en total installert kapasitet på 5,08 GW, som gir en middelproduksjon på 16,9 TWh [13]. Det prosjekteres og planlegges stadig nye vindkraftparker. Totalt har Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) behandlet ferdig 7061 konsesjonssøknader og per dags dato er det 411 konsesjonssøknader under behandling [14]. På Figur 2 kan man se utvikling og utbygging av solkraft fra 2000-2023.



Figur 2: Historisk utvikling av installert effekt for vindkraftverk [15].

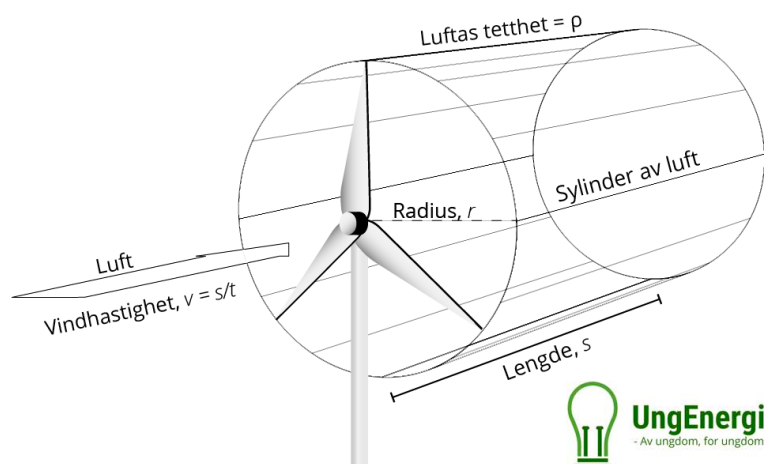
Betz' lov er en fysisk lov og angir hvor stor del av energipotensialet som passerer en vindturbinens sveipede areal som kan utnyttes. Maksimal teoretisk utnyttelse av bevegelsesenergien i vind er 59.3%. I praksis klarer dagens vindturbiner å utnytte ca 40% av bevegelsesenergien i vind [16]. Energipotensialet kan beregnes med følgende Formel 1 [17]:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (1)$$

$\rho$ : Tettheten til luft.

$A$ : Tilsvarer arealet av turbinbladene som roterer i sirkel.

$v$ : Er vindhastigheten til vinden.



Figur 3: Sveipeareal for vindturbin [17].

Et vindkraftverk vil ha en lavere brukstid sammenlignet med for eksempel vannkraft. Dette er fordi vinden vil være mer ustabil og vil variere. Dette vil påvirke kapasitetsfaktoren på vindkraftverket og den vil normalt ligge på ca 30 – 38%. Hvis det er for lite vind vil ikke turbinen rotere, og er det for mye vil vindturbinen stoppe. Disse grensene ligger vanligvis på under 3 m/s og over 25 m/s, men avhenger av turbinens størrelse og design [18].

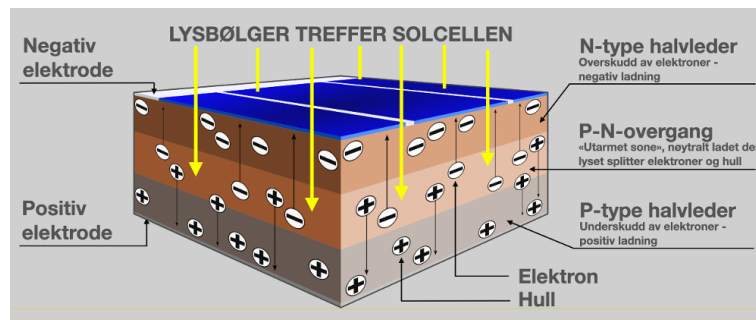
Vindkraft vil være en god tilleggsforsyning sammen med annen kraftproduksjon. Vindkraft i seg selv vil ikke være stabilt nok til å forsyne abonnenter. Ved å kombinere flere kraftverk kan man oppnå en mer stabil produksjon. Vindkraft krever store arealer siden vindenergien er spredt [19]. Utbygging av vindkraft har blitt mer lønnsom de senere årene grunnet ny teknologi og stor omsetting av vindturbiner [12]. Vindkraft er et omdiskutert tema fordi mange ikke vil ødelegge utmarksressursene og naturlandskapene. Ettersom vindparker vil kreve store områder med bygging og infrastruktur vil dette føre til store inngrep i naturen. Dette er en av ulempene med vindkraft. Fordelen er at det er produksjon av en ren energi [19].

## 2.3 Solkraft

Solkraft er en form for fornybar energi som utnytter energien fra sollyset og konverterer det til elektrisk energi. Solkraft er en stadig mer populær og viktig energikilde [20].

Solkraftsystemer består av solcellepaneler som er laget av silisium eller andre halvledere som er i stand til å absorbere sollys og generere en elektrisk ladning. Solcellepanelene er sammensatt av flere solceller koblet sammen, og hver solcelle består av to lag med halvledende materialer som danner en pn-overgang. Når sollyset treffer solcellen, genererer det en elektrisk spenning mellom de to lagene, og elektroner strømmer fra det negativt ladde laget til det positivt ladde laget. Dette skaper en strøm som kan brukes til å drive

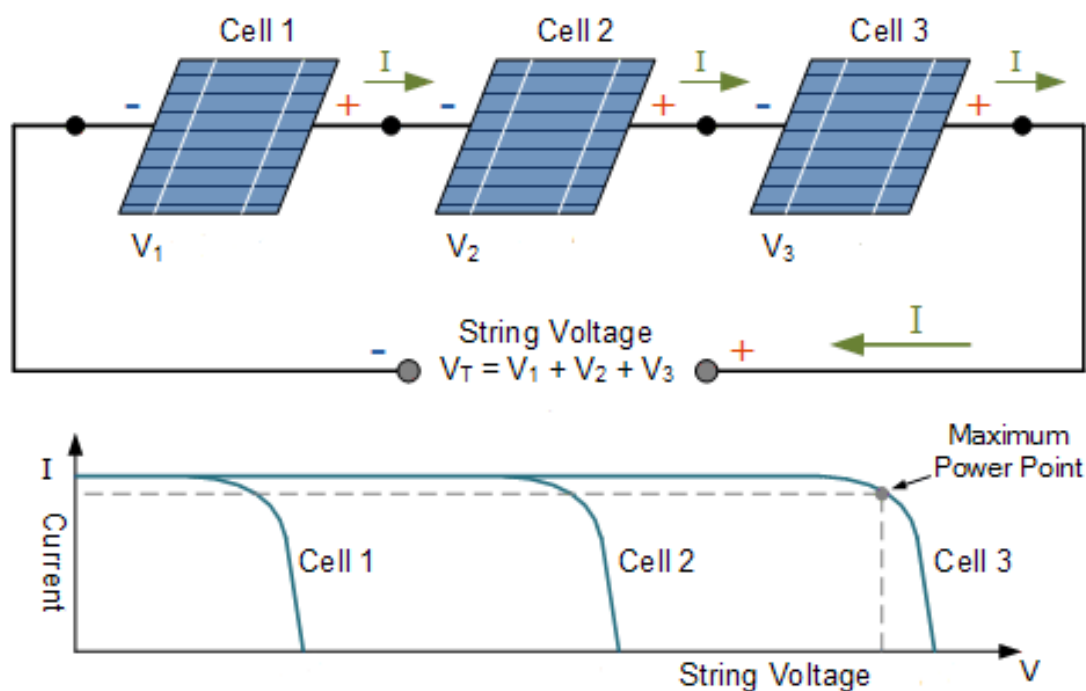
elektriske apparater. Oppbyggingen kommer fram i Figur 4 [21].



Figur 4: Oppbygging av solceller [21].

En av de viktigste komponentene i et solkraftsystem er inverteren. Den konverterer likestrøm (DC), produsert av solcellepanelene, til vekselstrøm (AC) som kan distribueres til strømmettet [22].

Figur 6 viser prinsippet for seriekobling av solcellepaneler. + og - kobles sammen for å danne seriekoblingen. Spenningen for hvert panel legges sammen til en total spenning [23]. Strømmen  $I$  vil forholde seg lik ved en seriekobling.



Figur 5: Seriekobling av solcellepaneler [23].

Formel 2 viser den elektriske effekten fra et solcellepanel beregnet ut fra spenningen over solcellepanelet og strømmen ut av solcellen.

$$P_{el} = U * I \quad (2)$$

$P_{el}$ : Elektrisk effekt fra solcellepanelet.

$U$ : Spenningen over solcellepanelet.

$I$ : Strømmen ut av solcellen.

Effektpotensialet fra solinnstrålingen på en flate kan beregnes ut fra Formel 3:

$$P_{sol} = \Phi_{inn} * A \quad (3)$$

$P_{sol}$ : Effektpotensialet fra solinnstrålingen.

$\Phi_{inn}$ : Gjennomsnittlig lysintensitet på solcellen i  $W/m^2$ .

$A$ : Solpanelets effektive areal i  $W/m^2$ .

Formel 4 viser beregning av virkningsgraden til et solcellepanel.

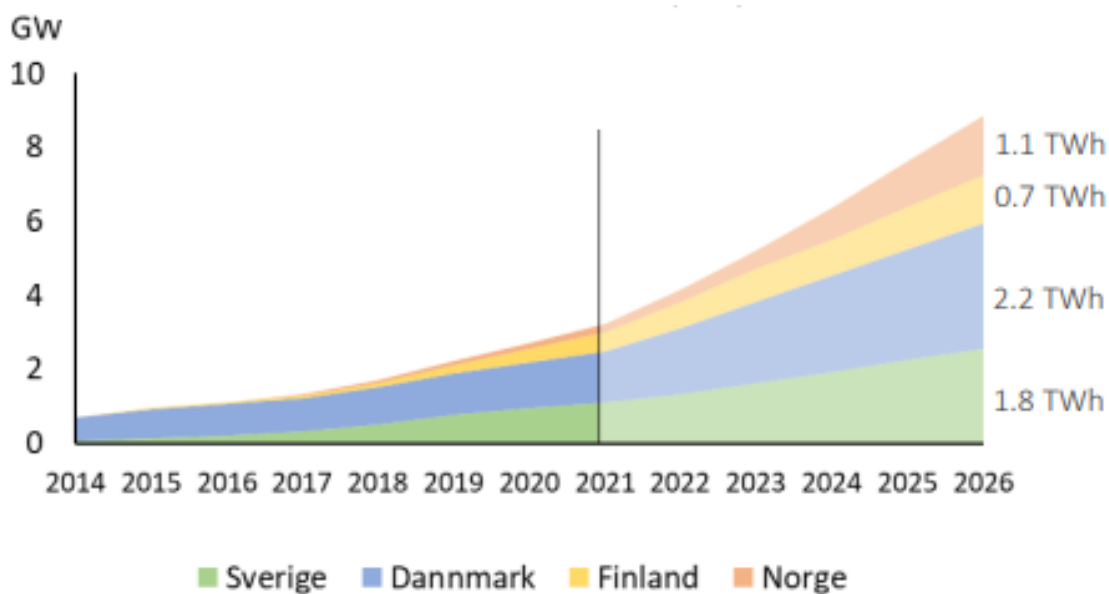
$$\eta_{celle} = \frac{P_{el}}{P_{sol}} \quad (4)$$

$\eta_{celle}$ : Virkningsgrad.

For å hente ut så mye effekt som mulig fra et solkraftanlegg er det dermed fordelaktig med høy virkningsgrad og lysintensitet.

Solkraftsystem er vanligvis tilkoblet energilagringssystem, ofte batteri, eller kun til strømmettet. Energilagring gjør at man kan forskyve forbruket av den produserte kraften til tider av døgnet solen ikke skinner, mens ved nettilknytning forbrukes strømmen kontinuerlig [24].

Solkraft utgjør en liten del av kraftproduksjonen i Norge. Det er stadig under utvikling og vokser raskt på markedet. Det er tilknyttet om lag 299 MW solkraft til nettet i Norge ved utgangen av 2022. Dette vil gi en kraftproduksjon på ca 225 GWh. Det ble tilknyttet 149 MW solkraft til nettet i løpet av 2022 [25].



Figur 6: Historisk utvikling av installert effekt for solkraft [26].

I 2022 ble den første konsesjonen for solkraftverk i Norge gitt [27]. Furusetth solkraftverk har en installert effekt på 7 MW. Av den totale produksjonen i Norge utgjør større solkraftverk (50 kW og større), bare 5% av antall anlegg i Norge. Disse anleggene produserer likevel 50% av den totale produksjonskapasiteten til solkraft i Norge. Per idag finnes det ikke større enkeltstående solkraftverk i Norge, men NVE ser at interessen fra kraftprodusentene er økende for strømproduksjon med sol som energikilde [28].



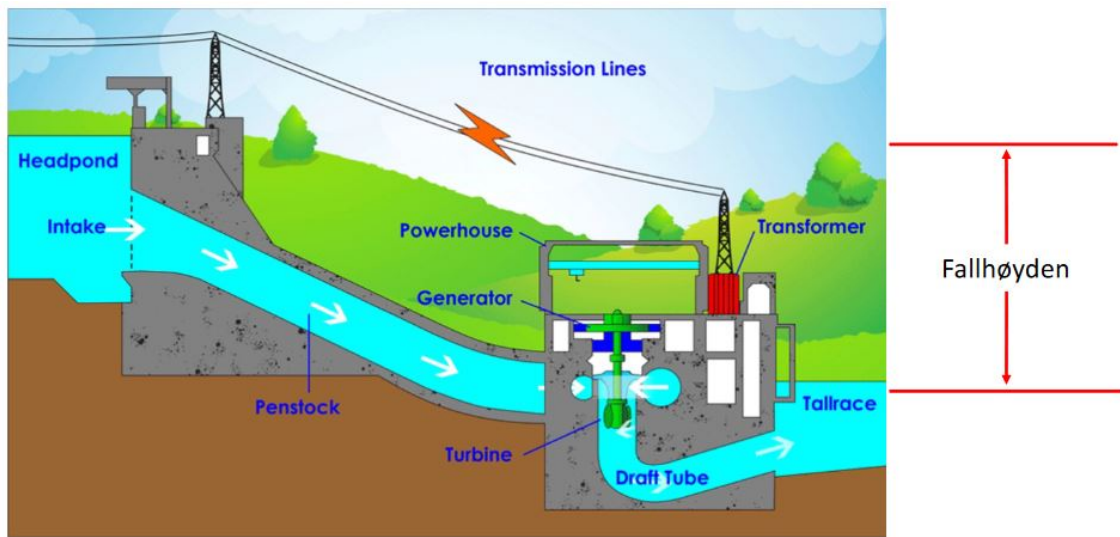
## 2.4 Elvekraft

Det finnes i hovedsak tre typer vannkraftverk; elvekraftverk, pumpekraftverk og magasin-kraftverk. I Norge kommer 90% av samlet kraftproduksjon fra vannkraft som ved inngangen av 2022 har en produksjonskapasitet på 33,4 GW. Grunnlaget for vannkraftproduksjon dannes av vanntilsg og den installerte produksjonskapasiteten [29]. Vanntilsg er den mengden vann som renner til et vassdrags totale nedbørsfelt i løpet av ett år. Denne vannmengden kan variere fra år til år. Perioder på våren med snøsmelting, og nedbør på sommer og høst bidrar mest til vanntilsg. Det nyttbare tilsg utgjør den delen som kan utnyttes til kraftproduksjon etter fordampning og flomtap [30].

Elvekraftverk er vannkraftverk i elv hvor den kontinuerlige vann-gjennomstrømmingen utnyttes til kraftproduksjon. De har normalt ikke magasiner og oppdemming av landområder, og kalles ofte lavtrykkskraftverk. Lavtrykkskraftverk kjennetegnes av høy vannføring og lav fallhøyde, og kraftverket er avhengig av elvens naturlige vannføring. Dette gjør en regulering av produksjon vanskelig [31].

I perioder med mye nedbør og snøsmelting, vil elven kunne få høy vannføring. Ved høy vannføring er det ofte kapasiteten til generatoren i kraftverket som blir begrensningen, og vann renner forbi uten å generere kraft. Dette kalles flomtap. Ved lav vannføring blir produksjonen også lavere, og kan bli helt borte som følge av at turbinene må slås av. Dette kan skape en ujevn kraftproduksjon, som ikke kan styres etter forbruket. Elvekraftverk er ofte villige til å produsere til priser rett over null, da de har lave variable kostnader og vann kommer gratis [31].

Inne i kraftstasjonen står det en turbin og en generator. Turbinen drives av at rennende vann treffer turbinen så den beveger seg, og generatoren omformer trykk og bevegelsesenergi til elektrisk energi ved hjelp av elektromagnetisk induksjon. Vannet føres ut i elven igjen etter å ha strømmet gjennom turbinen. Det finnes flere typer turbiner som brukes i elvekraftverk. Kaplanturbin som har løpehjul formet som en propell er best egnet for lave fallhøyder, og er mye brukt i norske elvekraftverk. Francisturbin er best egnet i mellomstore fallhøyder, og den mest bruke i norske vannkraftverk [32]. Peltonturbin er mest brukt i vannkraftverk med store fallhøyder over 400 m, men brukes også i elvekraftverk. Pelton turbinen er en impulsturbin, hvor løpehjulet roterer ved at vannet fra strålene treffer skovlene som er fordelt rundt løpehjulet. Løpehjulet er festet til generatorakslingen med en bolt forbindelse [33].



Figur 7: Skjematisk tegning av prinsippet bak vannkraft [34].

Effekten fra et vannkraftverk kan beregnes ut fra følgende Formel 5:

$$P = m * g * h * \eta_{tot} \quad (5)$$

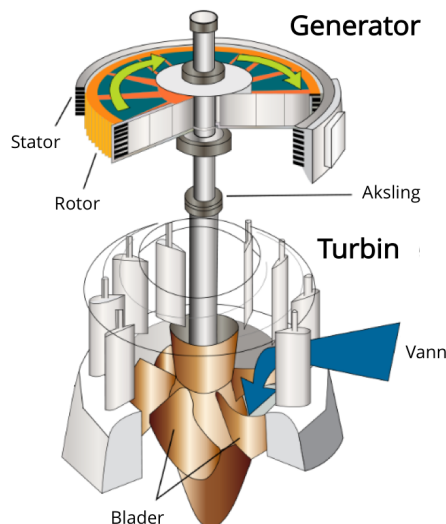
$m$ : Massestrøm i  $kg/s^2$ .

$g$ : Tyngdekraft,  $9,81m/s^2$ .

$h$ : Fallhøyde i meter.

$\eta_{tot}$ : Virkningsgraden på kraftverket.

Figur 8 viser prinsippskisse av en generator. Generatoren består av magneter, og spoler av kobberledning. Den krever en ekstern energikilde for å få rotoren til å rotere, som for eksempel turbin drevet av vannkraft [35].



Figur 8: Prinsippskisse av generator og turbin [34].

Indusert spenning fra generator kan regnes ut med følgende Formel 6:

$$\epsilon = -N * \frac{d}{dt} \Phi = -N * \frac{d}{dt} (B * A) \quad (6)$$

$\epsilon$ : Indusert spenning.

$N$ : Vindinger i spolen.

$\frac{d}{dt} \Phi$ : Flukstetthet i spolen over tid i Weber per sekund.

$B$ : Feltstyrke i Tesla.

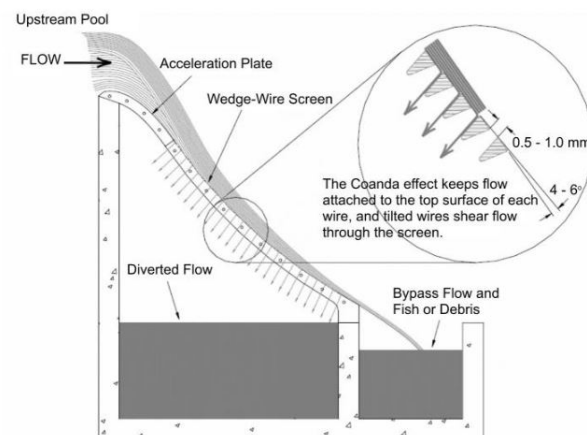
$A$ : Viklingens tverrsnittareal i  $m^2$ .

Inntaket er stedet hvor vannet renner inn i elvekraftverket gjennom et rør eller en tunnel, og ledes gjennom turbinen. Overflødig vann ledes utenom inntaket, og varegrinder sørger for at store gjenstander samles opp og ledes forbi. Grinden består vanligvis av parallelle flatjern som står skrått og vertikalt med åpninger som varierer med type turbin i kraftverket. Flomløpet skal lede vann som ikke brukes til kraftproduksjon forbi demning [36]. Inntaksmagasinet må tilpasses lokasjon, og har forskjellige form og dybdeforhold. Coanda-inntak er en spesiell type overfallsinntak som er tatt i bruk på småkraftverk, der vannet strømmes over en terskel og nedover en rist. Målet er størst mulig driftssikkerhet og å hensynta fisk, men det kan være noen utfordringer med ising og algevekst [37]. I en undersøkelse Multiconsult har gjort for NVE med Coanda-inntak på 30 småkraftverk i Norge, kom det frem at halvparten har utfordring med is og kunne ha flere driftstanser som følge av det per år [37].

Figur 9 viser Coanda-inntak og Figur 10 viser prinsippet av oppbyggingen. Navnet kommer etter Coanda-effekten og er den egenskapen strømmende væsker og gasser har til å bøye av og følge faste overflater [37].



Figur 9: Coanda-inntak [38].



Figur 10: Skisse over prinsippet med Coanda-effekt inntaksrist [37].

## 2.5 Kapasitetsfaktor kraftverk

Kapasitetsfaktor er et tall som angir hvor stor del av kraftverkets teoretiske produksjonspotensiale som blir utnyttet over en periode, i dette tilfelle ett år [39].

Kapasitetsfaktoren til kraftverkene kan regnes ut med følgende Formel 7:

$$k = \frac{E}{P * 8760} * 100\% \quad (7)$$

$E$ : Årsproduksjon.

$W$ : Installert effekt.

8760: Antall timer i et år

## 2.6 Krafttransformator

En krafttransformator er en elektrisk maskin som brukes til å endre spenningen i en elektrisk krets. En transformator består av en primærspole og en sekundærspole som er koblet sammen av en magnetisk kjerne. Når vekselstrøm passerer gjennom primærspolen, genererer det et magnetfelt i kjernen, som igjen induserer en spenning i sekundærspolen. Spenningsforholdet mellom primær- og sekundærspolen bestemmes av antall viklinger på hver spole [40].

Krafttransformatorer brukes til å endre spenningsnivået i kraftnettet for å overføre elektrisk kraft over store avstander med minimalt tap av energi. I høyspenningsnett, for eksempel, er det transformatorer som brukes til å øke spenningsnivået fra produsentene til overføringslinjene kjent som step-up-transformatorer, mens transformatorer som brukes til å senke spenningsnivået fra overføringslinjene til distribusjonsnettene kalles step-down-transformatorer [40].

Krafttransformatorer er konstruert for å tåle høye strømmer og spenninger og må derfor ha en robust konstruksjon og isolasjon. Transformatorer kan også ha forskjellige kjer-neteknologier, inkludert kjerne i jern eller andre materialer, avhengig av applikasjonen og kravene til transformatorprestasjonen [40].

Transformatorer har også en viktig rolle i å beskytte kraftsystemet mot overbelastning og kortslutning. Transformatorer er utstyrt med beskyttelsesanordninger, som sikringer og brytere, for å beskytte mot overbelastning og kortslutning. I tillegg kan transformatorer være utstyrt med spesialfunksjoner, som fasevinkelforskyvning og harmonisk filtering, for å forbedre kvaliteten på kraftforsyningen og sikre at elektrisk utstyr fungerer optimalt. Krafttransformatorer spiller derfor en viktig rolle i overføring og distribusjon av elektrisk kraft og er en nødvendig komponent i kraftsystemet [40].

Transformatoren vil med årene eldes og dens egenskaper vil bli dårligere. Harde belastninger som fører til høy driftstemperatur og høy oljetemperatur vil være faktorer som påvirker levetiden til en transformator. Ulike sviktårsaker som vil oppstå kan være gjennomslag i hovedisolasjon, jord- eller kortslutning. Videre kan det oppstå mekanisk deformasjon av vikling, kjernebrann og havari av delkomponenter. Ved høy belastning og høye temperaturer vil levetiden reduseres [41].

Reaktiv effekt oppstår på grunn av transformatorviklingens induktive motstand (reaktans), som forårsaker en faseforskyvning mellom spenningen og strømmen [42] [43]. Reaktiv effekt bidrar ikke til nyttig arbeid, men krever likevel en del av den tilførte energien og oppgis i VAr [44]. For å optimalisere effektiviteten i et kraftsystem, er det ønskelig å ha en høy cosinus phi (effektfaktor) og høy aktiv effekt. En høy cosinus phi indikerer en liten faseforskyvning mellom strøm og spenning, som reduserer den reaktive effekten og forbedrer energiutnyttelsen [45]. Man ønsker høy aktiv effekt for å maksimere den nyttige arbeidsytelsen til transformatorer og minimere tap. Ved å opprettholde en høy cosinus phi og aktiv effekt kan man oppnå en mer effektiv og økonomisk drift av transformatorer og kraftsystemer. Den reaktive effekten kan eksempelvis reduseres ved bruk av kondensatorbatteri [46]. Den vil kompensere for de reaktive belastningene som befinner seg i strømmettet, som transformatorer, motorer og sveiseapparat [47].



Figur 11: Krafttransformator på Stokkfjellet.

## 2.7 Dimensjonering av transformator

Dimensjonering av transformator vil variere fra prosjekt til prosjekt og bruksområde. En transformator til produksjon og last bør dimensjoneres etter høyeste produksjon for å utnytte kraftverkene mest optimalt. Det vil ikke være ønskelig å ha en for liten transformator som fører til tap i produksjon. Det vil være forskjellig tap i transformatorer som kan beregnes ut i fra merkedata [48].

### 2.7.1 Tomgangs- og belastningstap

Tap i en transformator består av to enheter, tomgangstap og belastningstap. Tomgangstap skal være opplyst fra fabrikanten og står enten på merkeskiltet eller i databladet. Belastningstapet i en transformator kan finnes med Formel 10 [49].

$$P_{CU} = \frac{k^2 * S_n * e_r}{100} \quad (8)$$

$P_{cu}$ : Koppertap i W

$k$ : Belastningsgrad

$S_n$ : Nominell transformator kapasitet i kVA

$e_r$ : Kortslutningsspenning i %

Eventuelt ved bruk av følgende formel:

$$P_{CU} = P_0 + \left(\frac{S_b}{S_n}\right)^2 * P_b \quad (9)$$

$P_0$ : Tomgangstap i kW

$S_b$ : Transformatorbelastning i kVA

$P_b$ : Belastningstap i kW

Det totale effekttapet blir summen av tomgangstap og belastningstap:

$$P_{tap} = P_0 + P_{CU} \quad (10)$$

$P_{tap}$ : Effekttap i transformator i W

### 2.7.2 Levetid

For å beregne levetid for transformatorer med tanke på høybelastning og varmgang vil det være Formel 11 som skal benyttes. Denne tar for seg "topp-olje" temperaturen som måles på transformatoren. Denne divideres med oljens "Hot-spot" temperatur ved transformatorens merkelast. Det blir benyttet tabeller for trafostørrelser med merkedata for å beregne levetiden [50] [51].

$$\text{Relativ aldringshastighet } V = \frac{\text{Aldringshastighet ved temp } T_h}{\text{Aldringshastighet ved temp } 98^\circ\text{C}} = 2^{\frac{T_h-98}{6}} \quad (11)$$

### 2.7.3 Bryteranlegg

Bryteranlegget skal sikre mot overspenning, overbelastning, kortslutningstrømmer, måle spenningskvalitet og strømgjennomgang. Ved både produksjon og forbruk er bryteranlegg helt elementært for å sikre en stabil og trygg strømforsyning. Et bryteranlegg står som oftest alltid sammen med en transformator, og inneholder blant annet brytere, sikringer og måleutstyr [52].

Det finnes to måter å bygge ett bryteranlegg på, luftisolert bryteranlegg (AIS) og gassisolert bryteranlegg (GIS). Hovedforskjellen mellom disse to er at AIS er mer arealkrevende enn et GIS anlegg, og et større AIS anlegg er plassert utendørs, mens et GIS anlegg vil være installert innendørs. De to ulike bryteranleggs-typene har sine fordeler og ulemper. NVEs rapport om sammenligning av GIS og AIS oppsummer følgende [53].

Tabell 1: Fordeler og ulemper med luftisolerte og gassisolerte anlegg

Type anlegg	Fordeler	Ulemper
<b>GIS-anlegg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Berøringssikkert</li> <li>-Reduseert støy</li> <li>-Arealbesparende</li> <li>-Mindre vedlikeholdsbehov</li> <li>-Beskyttet mot klimapåvirkninger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Lang leveringstid på utsatte komponenter</li> <li>-Utslipp av SF6 gass kan gi store konsekvenser (farlig klimagass)</li> <li>-Høye revisjonskostnader</li> <li>-Komplisert revisjon</li> <li>-Lite fleksibilitet</li> <li>-Behov for ekstern assistanse fra leverandør/producent</li> </ul>
<b>AIS-anlegg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ved høye spenningsnivåer er AIS billigere enn GIS</li> <li>-Lett tilgang til feilutsatte komponenter</li> <li>-Lavere risiko for klimagassutslipp</li> <li>-Større grad av fleksibilitet ved utvidelser av anlegget</li> <li>-Standardisert utstyr og arbeidsprosedyrer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Arealkrevende</li> <li>-Krever mer vedlikehold enn GIS</li> <li>-Mer støyutsatt</li> <li>-Utsatt for ekstremvær</li> </ul>

Figurene 12 og 13 viser forskjellen i hvor arealkrevende de to forskjellige bryteranleggene er.





Figur 12: GIS - gassisoleret bryteranlegg, foto: Fredrik Ringe/Lyse Konsern.



Figur 13: AIS - luftisoleret bryteranlegg,  
foto: Peter Tubaas/ABB.



Figur 14: 132 kV delen av innendørs AIS-bryteranlegg på Stokkfjellet.

## 2.8 Beregning av annuitetsfaktor

For å beregne terminbeløp for investeringskostnaden er det beregnet en annuitetsfaktor. Det er tatt utgangspunkt i en fast rente. Dette vil gi et terminbeløp som nedbetaler lånet hvert år.

$$\varepsilon_{n,r} = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \quad (12)$$

$\varepsilon_{n,r}$  Annuitetsfaktor.  
 $n$ : Antall terminer.  
 $r$ : Rente.

$$\text{Terminbeløp} = \text{Annuitetsfaktor} * \text{lånesum} \quad (13)$$

Eventuelt kan denne beregningen utføres ved hjelp av denne formelen som vil gi samme terminbeløp som beregning av annuitetsfaktor:

$$\text{Terminbeløp} = \text{Lånesum} * r * \frac{(1 + r)^n}{(1 + r)^n - 1} \quad (14)$$

$n$ : Antall terminer.  
 $r$ : Rente.

Det vil være vanskelig å spå fremtidsutsiktene for den norske styringsrenten, per 01.05.23 er styringsrenten fra Norges Bank på 3 % [54]. Norges Banks prognoser fra mars 2023 viser at utlånsrenten for privatmarkedet vil ligge rundt 5 % frem til 2025 [55].

Lån for bedrifter og næringsvirksomhet vil variere noe mer med tanke på risiko, og typelån for banken. Bedriftslån er ofte dyrere enn et privatlån [56].

## 2.9 Digitale verktøy

I denne oppgaven er det benyttet dataprogrammer for å utføre analyser av data som ble innhentet.

PVsyst er et dataprogram som brukes til å designe og simulere solcellesystemer. Programmet inneholder en rekke verktøy og funksjoner. Programmet kan beregne solcelleanleggets ytelse basert på solinnstråling, temperatur og skydekke. PVsyst kan prosjektere og simulere et komplett anlegg med solcellepaneler, inverttere, kabler og transformatorer.

Programmet er åpent for alle brukere med lisens [57].

Videre har det blitt benyttet Python for programmering. Dette programmet er brukt til analysering og plotting av grafer. Python er et lettlest og anerkjent programmeringsspråk som er åpent for alle brukere [58]. Python kan blant annet skrives i Jupyter eller VS Code, som er utviklings plattformer [59].

## 3 Data

Dette kapittelet beskriver data som brukes i oppgaven, og hvordan de er samlet inn.

### 3.1 Datainnsamling

For å kunne sette opp en sammenstilling av produksjon fra vind-, sol- og elvekraftverk etterspørres data i samme format fra kraftselskapene. Det er ønskelig å få inn data fra et helt år, i dette tilfelle år 2022, i timeserier i Excel. De som ble kontaktet har vært behjelpelig med deling av informasjon og data.

Data for effektflyt i Selbu kommer fra Tensio. Datasettet er i samme format som resten av dataene. På grunn av manglende tilgang for lastflytanalyse i NetBas, blir ikke data benyttet i oppgaven.

Data for solinnstråling for Stokkfjellet (målepunkt: 63.130969N 11.201892E) i 2022 kommer fra Aneo. De brukes i PVsyst til å simulere produksjonsprofiler per time.

Vind- og elvedata er fra 2021 og 2022. Det blir valgt å benytte data fra 01.01.22 til 01.12.22, da vindkraftverket ikke hadde oppstart før høsten 2021. Disse timesverdiene er i megawattimer.

Tabell 2: Oversikt over datasett som er benyttet for prosjektoppgaven

Datasett	Beskrivelse	Dato	Enhet	Tidsoppløsning	Kilde
1	Produksjonsdata-Stokkfjellet vindkraftverk	01.01.22 – 31.12.22	MWh/h	Time	Aneo AS
2	Produksjonsdata-Molnåa kraftverk	01.01.22 – 31.12.22	MWh/h	Time	Selbu energiverk
3	Effektflyt i Selbu	01.01.22 – 31.12.22	MW/h	Time	Tensio TS
4	Forbruk i Trøndelag	01.01.22 – 31.12.22	MWh/h	Time	Elhub
5	Solinnstråling-Stokkfjellet	01.01.2022 - 31.12.2022	Wh/m <sup>2</sup>	Time	Aneo AS (basert på satellittdata)
6	Strømpriser NO3	2018-2022	Øre/kWh (eller NOK/MWh)	Time	Elkompis / Nord Pool
7	Værdata fra Selbu (lufttemperatur, middelvind, snødybde og nedbør)	01.01.22 – 31.01.22	°C, m/s og mm	Time	Norsk Klimasenter (Selbu målestasjon SN68290)
8	Soldata fra Trondheim	01.01.22 – 31.01.22	Antall soltimer	Time	Norsk Klimasenter (Trondheim målestasjon SN68103)
9	Valutakurs	November 2022			Norges Bank
10	Investeringskostnader for transformator på 120-150 MW	November 2022	MEuro	Euro	Siemens Energy

### 3.2 Strømpriser

Det hentes inn strømpriser for prisområde NO3, for en tidsserie fra 2018-2022. Det beregnes en gjennomsnittspris av dette, eksklusive merverdiavgift. Det skal brukes til å undersøke inntekter for kraftsalg mot investeringskostnader på krafttransformator i den generelle analysen[60].

Tabell 3: Strømpriser i øre/kWh for NO3 inkl mva

Måned/År	2022	2021	2020	2019	2018
Januar	32,98	56,86	29,12	64,12	38,97
Februar	22,59	55,1	17,43	55,17	47,54
Mars	21,6	31,75	23,53	49,97	53,8
April	56,34	34,7	6,6	49,7	47,12
Mai	19,7	46,1	12	47,26	40,65
Juni	14,79	44,6	4,22	31,66	53,27
Juli	2,38	59,26	3,4	41,57	62,02
August	23,61	74,47	8,49	45,62	61,8
September	94,12	67,39	13,38	41,38	58,77
Oktober	44,97	31,23	16,36	46,25	50,88
November	79,72	52,15	6,24	52,22	56,97
Desember	226,91	75,96	18,88	44,69	62,7

### 3.3 Vindkraftverk

Aneo bidrar med produksjonsdata på Stokkfjellet vindpark for år 2022, som timeserie i MW i Excel. Sommeren 2022 var prisene på strøm så lave at Aneo valgte å stenge av kraftproduksjon, da det ikke var økonomisk lønnsomt. I tidsrommet 28.juni til 14.aug mangler det derfor data på produksjon. Aneo sender også data på AI genererte prognoser på kraftproduksjon for hele år 2022, og det blir valgt å bruke data fra AI prognosen i tidsrommet hvor vindturbiner var nedstengt for å få et helt år med produksjon til dataanalysen.

### 3.4 Solkraftverk

Siden solkraftverket ikke eksisterer per i dag, simuleres produksjonsdata fra et tenkt solkraftverk på Stokkfjellet. Metoden blir utdypet under valg i PVsyst. Soldata blir simulert i 2 MW og i 50 MW, og deretter omgjort til 1 MW for bruk til oppjustering både i case-studie og generell analyse. Produksjonen er skalert ved hjelp av Formel 15.

### 3.5 Elvekraftverk

Produksjonsdata i timeserier i MW i Excel for hele år 2022 på Mølnåa elvekraftverk kommer fra Selbu Energiverk AS. Mølnåa kraftverk har installert effekt på 1.5 MW. I case-studie brukes data med installert effekt på 1.5 MW. I den generelle analysen blir produksjon først omgjort til 1 MW, og deretter justert opp ved de forskjellige produksjonsalternativene. Produksjonen er skalert ved hjelp av Formel 15.

### 3.6 Effektflyt og forbruk

Tensio bidrar med data for effektgjennomgang fra tre transformatorstasjoner i Selbu i timeserie i Excel. Fra Elhub hentes det ut forbruksdata for prisområde NO3 i excelfiler per døgn [61]. På grunn av nettstrukturens kompleksitet brukes ikke disse data i denne oppgaven.

### 3.7 Værdata

For å kunne analysere produksjonsdata fra kraftverkene, er det interessant å sammenligne med værdata fra Selbu for året 2022. Værdata kommer fra observasjoner og værstatistikk på Norsk Klimasenter [62]. Det hentes ut værdata på lufttemperatur, middelvind, snødybde og nedbør pr time fra målestasjon Selbu II, Stasjon SN68290.

Videre er det interessant å sammenligne antall soltimer i løpet av år 2022 med simulert produksjon fra solkraftverk. I Selbu er det ingen målestasjoner som loggfører soltimer. Soldata hentes derfor fra Trondheim- Gløshaugen, Stasjon SN68103 [62].

### 3.8 Simulering av solproduksjon i PVsyst

I oppsett av prosjektet i PVsyst gjøres valg for å oppnå de rette innstillingene. Det importeres værdata og global solinnstråling gitt av Aneo for området på Stokkfjellet. Det gitte punktet er på koordinatene 63.130969N 11.201892E. Videre blir det valgt type solcellepanel og inverter. Det benyttes solcellepanel av typen JA-solar 550 watt-peak (Wp) med bifacial-modul, et solcellepanel som absorberer sol på begge sider. Typen inverter som benyttes er Huawei 160 kW. Disse produktene er gitt av Aneo.

Panelene monteres horisontalt med en vinkling på 30 grader. Panelene monteres på stativ i to høyder med 27 moduler i hver rekke. Moduler er navnet PVsyst bruker for solcellepanel. Dette vil gi en spenning på 800 V over hvert panel, som er optimal spenning for valgte paneltype. Panelene monteres 1,5 meter over bakken og det vil være 15 m mellom hvert bord. Et bord er to parallelle rekker med seriekoblede paneler montert på samme stativ. Dette gir god lufting mellom panelene, og sjansen for snøfonder minimeres.

Ved å gjøre simuleringene for det valgte koordinatet får man ut gode rapporter. Rapportene gir blant annet verdier for produksjon, tap i systemet og virkningsgrad.

Prosjekt for 2 MW:

Tabell 4: Parameter brukt i PVsyst

<b>Innstilling:</b>	<b>Antall</b>
Moduler i serie	27
Nb of strings	140
Nb of MPPT inputs	90
Paneler	3780
Invertere	10

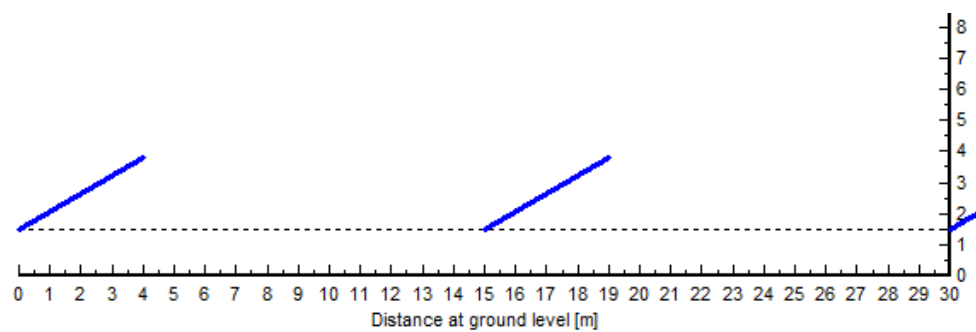
Tabell 4 viser innstillinger brukt i simuleringen for 27 solcellepaneler koblet i serie. Dette systemet er delt opp i 70 bord. Ett bord tilsvarer  $27 * 2 = 54$  moduler. Nb of strings kommer av at det er plassert ut 70 bord som hver har to høyder som gir 140 seriekoblinger. Nb of MPPT inputs er antall tilgjengelige kurser på inverteren. For dette systemet er det 10 invertere. PVsyst hjelper til med disse innstillingene ved dimensjonering av anlegg. Bordene plasseres på det valgte området med 5 rekker. Installert effekt er på 2,09 MWp og anlegget leverer maksimalt 1,6 MW til nettet. Det vil være tap i kabling, koblingspunkter og invertere. Figur 15 viser oppsett av bordene.

Prosjekt for 50 MW:

Tabell 5: Parameter brukt i PVsyst

Innstilling:	Antall
Moduler i serie	27
Nb of strings	3372
Nb of MPPT inputs	2164
Paneler	91044
Invertere	90

Dette systemet er delt opp i 1686 bord. Ett bord tilsvarer  $27 * 2 = 54$  moduler. Dette vil være et stort anlegg og dekke et område på ca 161 mål av konsesjonsområdet på Stokkfjellet. Installert effekt er på 50,07 MW<sub>peak</sub> og anlegget leverer maksimalt 38,47 MW til nettet. Det vil være tap i kabling, koblingspunkter og invertere. Figur 15 viser oppsett av bordene.



Figur 15: Oppsett av solcellepanel med avstand mellom hver rekke og høyde over bakken



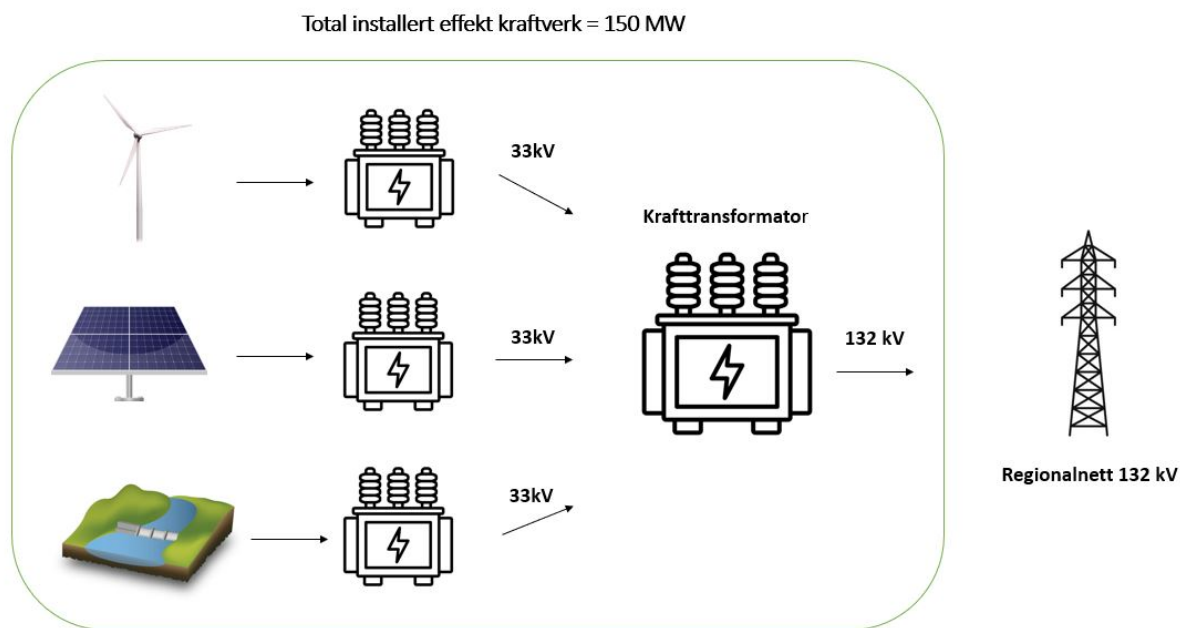
## 4 Metode

I dette kapitlet beskrives metodene som er brukt i undersøkelser av rapportens to problemstillinger.

### 4.1 Generell analyse

Ved å undersøke samspillet mellom alle tre kraftverk, og en felles krafttransformator, vil det vurderes forskjellige produksjonsalternativer. Målet er å komme frem til et alternativ som gir en jevn og hevet produksjon, høyest kapasitetsfaktor og en mest mulig forutsigbar kraftforsyning. Det undersøkes også hvilken produksjon som kan brukes for å heve bunnproduksjonen, uten å løfte toppproduksjonen.

Koding med programmeringsspråket Python gir mulighet til å prøve ut ulike installerte effekter fra de ulike kraftverkene, og få resultatet ut i grafer og kurver.



Figur 16: Generell analyse med teoretisk skalering av alle kraftverk

For å differensiere de tre krafttypenes påvirkning på kraftsammensetningens produksjon sammenlignes i generell analyse kraftsammensetninger hvor krafttypene har enten høy eller lav installert effekt, men i sum alltid 150 MW. Det vil gjøre det enklere å velge hvilket alternativ som skal undersøkes nærmere i en forbedret versjon. Høy verdi er konsekvent fem ganger større enn lav verdi. For hver kraftsammensetning analyseres det to transformatorytelser. Disse vilkår gir 14 produksjonsalternativer skissert i Tabell 8.

Tabell 6: Prinsippskisse for valg av høye og lave størrelser i PA 1 til 7

PA	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	7.2
Trafo	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L
Vind	H		H		H		L		H		L		L	
Sol	H		H		L		H		L		H		L	
Elv	H		L		H		H		L		L		H	

For å skalere produksjonsdata til å tilsvare produksjon fra kraftverk av forskjellig installert effekt blir produksjonsdata først omgjort til å tilsvare produksjon fra et 1 MW kraftverk. Deretter justeres produksjonsdata til forskjellige installerte effekter for produksjonsalternativene.

Produksjonen er skalert ved hjelp av Formel 15:

$$\text{Skalert timeserieverdi} = \frac{\text{Original timeserieverdi}}{\text{Installert effekt}} * \text{Ny installert effekt} \quad (15)$$

Tabell 8 er utdypet i Tabell 7 hvor man kan se produksjonsalternativenes kraftsammensetning og de ulike transformatorstørrelsene.

Tabell 7: Produksjonsalternativer generell analyse

PA	Vind [MW]	Sol [MW]	Elv [MW]	Installert effekt [MW]	Trafoytelse [MVA]
1.1	50	50	50	150	150
1.2	50	50	50	150	130
2.1	68,2	68,2	13,64	150,04	150
2.2	68,2	68,2	13,64	150,04	120
3.1	68,2	13,64	68,2	150,04	150
3.2	68,2	13,64	68,2	150,04	140
4.1	13,64	68,2	68,2	150,04	150
4.2	13,64	68,2	68,2	150,04	130
5.1	107	21,4	21,4	149,8	150
5.2	107	21,4	21,4	149,8	140
6.1	21,4	107	21,4	149,8	150
6.2	21,4	107	21,4	149,8	120
7.1	21,4	21,4	107	149,8	150
7.2	21,4	21,4	107	149,8	140

#### 4.1.1 Generell analyse - forbedret alternativ

Av de syv produksjonsalternativene velges et alternativ som skal undersøkes videre for en forbedret sammenstilling av installert effekt på kraftverkene.

Ved å justere størrelsene på installert effekt i tre forskjellige varianter, undersøkes hvilket forbedret alternativet som gir den jevneste flyten av produksjon, høyeste årsproduksjon, høyeste kapasitetsfaktor og høyeste netto overskudd ved valg av transformatoralternativ.

Det blir undersøkt ulike alternativer for sammensetning av installerte effekter for PA 5. Basert på resultatene som kommer frem i Tabell 13 og Figur 39 om at det er vindkraft som gir høyeste produksjon og kapasitetsfaktor, blir det valgt å holde en fast størrelse på vindkraft på 107 MW.

Tabell 8: Størrelser i PA 5 A, B og C

PA	Vind [MW]	Sol [MW]	Elv [MW]	Installert effekt [MW]	Trafoytelse [MVA]
5 A1	107	21,4	21,4	149,8	150
5 A2	107	21,4	21,4	149,8	140
5 B1	107	28	15	150	150
5 B2	107	28	15	150	130
5 C1	107	15	28	150	150
5 C2	107	15	28	150	140

For å vurdere produksjonsalternativene vil minimum, maksimum og total produksjon undersøkes i Figur 44 og Figur 45.

#### 4.1.2 Kostnad for transformator vs. inntekt fra kraftsalg

Det gjøres undersøkelser for å dimensjonere hele anlegget med de uregulerbare kraftverkene til en felles krafttransformator. Ut fra total installert effekt i MW er det ønskelig å finne ut hvor stor krafttransformatoren må være for å ta imot samlet kraftproduksjonen fra kraftverkene, og hvilken løsning som er mest økonomisk i forhold til installert ytelse på transformator.

Med bakgrunn i informasjon fra Aneo om at de ved bygging av nye kraftverk bruker å dimensjonere etter installert effekt på kraftproduksjonen for transformator, blir det vurdert til at det er ønskelig å unngå strupningstap på grunn av utilstrekkelig trafoytelse [63]. Alternativer for krafttransformator blir valgt til å være store nok til å unngå dette.

Krafttransformatorens levetid vil variere med tanke på hvor hardt den blir belastet. Ved å gå ned på en transformatorstørrelse som gir akkurat 0% i tap vil dette potensielt redusere trafoens levetid en del kontra en trafo med en størrelse lik den installerte effekten. Her vil faktorer som belastningstap og tomgangstap spille inn. For å regne ut tapene er man avhengig av datablad på transformatorene, og det viste seg utfordrende å finne. Derfor er det ikke vist en utregning for tap i rapporten.

Det undersøkes om valg av størrelse på transformator vil ha stor økonomisk betydning for hvert av alternativene. Det gjøres en analyse for årlige kostnader for krafttransformator

mot årlig inntekt fra kraftsalg for de ulike produksjonsalternativene, heretter kalt netto overskudd. Kostnaden for transformator er ekskludert moms.

Det er valgt å ta utgangspunkt i investeringskostnaden på en 33/132kV krafttransformator med installert effekt på 120, 130, 140 og 150 MVA.

Investeringskostnaden til transformatoren inkluderer transport, montasje på anleggsstedet, uttesting og oppfølging av leveransen til Norge. Budsjettprisene er levert av Siemens Energy AS, og er basert på en budsjettpris fra november 2022. Budsjettprisene er ikke-bindende, og opplyst i Euro [64].

Prisene ble kalkulert til norske kroner med valutakurser fra november 2022 [65].

Investeringskostnaden ble så regnet ut til en årlig investeringskostnad ved hjelp av Formel 12 og 14 som ligger under teori. Utifra markedsdata og prognoser per 01.05.23, velges det en utlånsrente på 6% som ansees som reelt for innkjøp av transformator.

Bryteranlegg er ikke tatt med i kostnadsberegninger for denne oppgaven. Dette vil påvirke terminbeløpene.

Investeringskostnader for kraftverkene er heller ikke inkludert i beregningene, og resultater må ses i lys av det.

Inntekter er basert på et gjennomsnitt av spotpris for prisområde NO3, for årene 2018-2022. Det blir brukt samme spotpris i kr/MWh på alle produksjonsalternativene. Spotprisen blir deretter multiplisert med utnyttet produksjon i MWh for hvert enkelt produksjonsalternativ og dette blir regnet som inntekt per år eks mva i Formel 16.

$$\frac{\text{Inntekt}}{\text{år}} = \text{spotpris} * \text{årlig utnyttet produksjon} \quad (16)$$

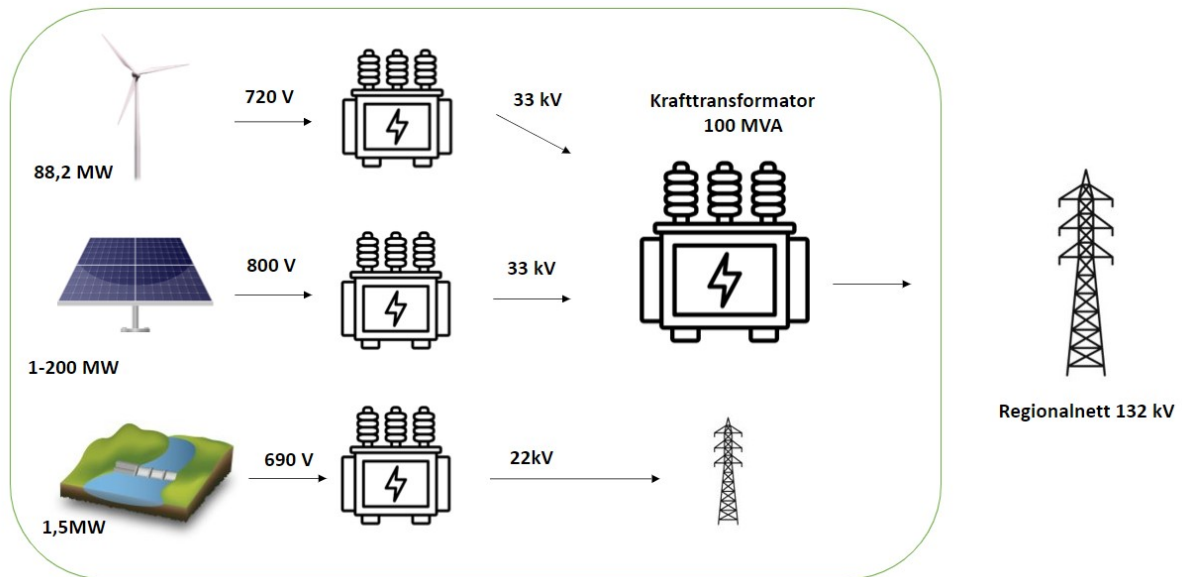
## 4.2 Case-studie Stokkfjellet - produksjonsalternativer

I case-studie undersøkes det hvordan et samspill mellom vindkraftverket på Stokkfjellet, og et solkraft kan gi en økt produksjon av kraft og økt inntjening for kraftselskapet.

Krafttransformatoren på Stokkfjellet har en installert ytelse på 100 MVA. Det undersøkes hvor stort et solkraftverk installert i samband med vindparken kan være ut i fra det spillerommet vindparkens krafttransformator gir, og hvor stort strupningstapet blir. En endring i krafttransformator og tilhørende nett vil utløse en ny konsesjonssøknad.

Mølnåa elvekraftverk er ikke tilkoblet samme krafttransformator som Stokkfjellet vindpark, og installert effekt for elvekraftverket blir ikke tatt med i beregningene for nyttiggjørt og total produksjon i hybridkraftverket med sol- og vindkraft.

Men siden elvekraftverket er med i generell analyse er det ønskelig å undersøke produksjonen på Mølnåa i forhold til det tenkte hybridkraftverket på Stokkfjellet. For å undersøke påvirkningen Mølnåa elvekraftverk vil ha på produksjonen i case-studie Stokkfjellet blir det produksjonsalternativene med og uten intallert effekt av elvekraft på 1.5 MW.



Figur 17: Case-studie Stokkfjellet med teoretisk skalering av solkraft

I case-studie Stokkfjellet benyttes samme type Python-script for å kalkulere nøkkelverdier. I stedet for å ha høye og lave verdier for krafttypene baseres størrelsene ut i fra situasjonen på Stokkfjellet. Vindkraft settes til 88.2 MW (originale produksjonsdata) og solkraft økes for hvert definerte produksjonsalternativ. Elvekraft medregnes ikke i beregning av av produksjon og strupningstap for hybridkraftverket. Det resulterer i produksjonsalternativ 1 til 21, vist i Tabell 15.

Tabell 9: Installert effekt for produksjonsalternativer i case-studie Stokkfjellet

PA	1	2	3	...	19	20	21
Vind (MW)	88.2	88.2	88.2	...	88.2	88.2	88.2
Sol (MW)	1	10	20	...	180	190	200
Elv (MW)	0	0	0	...	0	0	0

Ved økende installert effekt av solkraft vil det undersøkes hvor mye tap i produksjon som må medregnes etterhvert som totalproduksjon fra begge kraftverk øker. Tap i produksjon, strupningstap, kommer av at total produksjon er høyere enn ytelsen som krafttransformator har mulighet til motta.

Det gjøres en analyse på installert effekt for solkraft fra 1 MW til 200 MW i samspill med det eksisterende vindkraftverket på Stokkfjellet, og undersøkes hvor stor en totalproduksjon og en nyttiggjort produksjon vil kunne bli.

### 4.3 Databehandling i Excel og Python

Produksjonsdata sammenstilles for å gi en visuell oversikt over produksjonen gjennom året ved hjelp av Excel og Python-kode i Jupyter Notebook.

Produksjonsdata skaleres for å tilsvare kraftverk med ønsket installert effekt for vind-, sol- og elvekraft ut i fra Formel 15. Hver kraftsammensetning blir definert som et produksjonsalternativ.

Python script muliggjør effektiv kalkulering av nøkkelverdier for hvert produksjonsalternativ og etter en periode med utprøving velges de produksjonsalternativ som tas med i videre analyse.

Nøkkelverdier Python skriptet finner er årlig produksjon, maks produksjon, månedlig produksjon, årstimer med gitt produksjon, produksjon innenfor og produksjon som overstiger trafoytelse. For visualisering i grafer benyttes programvaren for å sortere og kategorisere produksjonsdata til varighetskurve og produksjonskurver.

Kostnader og kapasitetsfaktor kalkuleres i Excel på bakgrunn av datasett for hvert produksjonsalternativ.

## 5 Case-studie

I dette kapittelet beskrives og analyseres data fra kraftverkene i Selbu.

### 5.1 Stokkfjellet vindpark

Stokkfjellet vindpark ligger i Selbu kommune. Her har Aneo Vind bygd ut en vindpark. Planområdet dekker  $5.8 \text{ km}^2$ . Konesjon ble gitt i 2014 til Trønderenergi Vind AS. Endelig tillatelse blir gitt av Olje- og energidepartementet i september 2017. Konesjonsgitt ytelse er 90 MW, og søkt produksjon ligger på 306 GWh. Anlegget vil i løpet av et år produsere nok strøm til å kunne forsyne 20700 husstander [66].

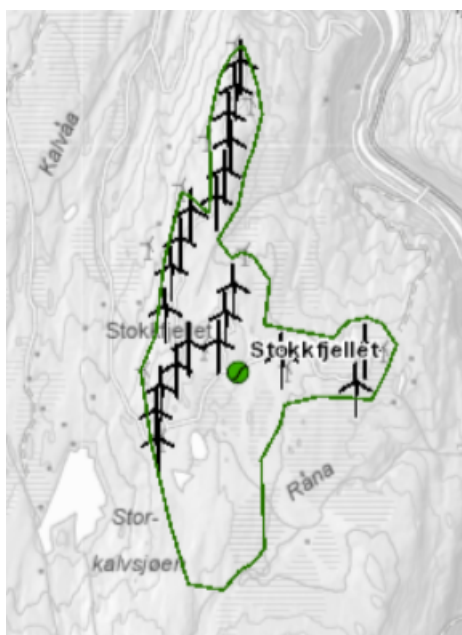
Tabell 10: Data om vindturbinparken på Stokkfjellet

Total installert data	88,2 MW
Årsproduksjon	311 GWh
Kapasitet per vindturbin	4,2 MW
Byggstart	Andre kvartal 2019
Ferdigstilt	Fjerde kvartal 2021
Antall turbiner	21
Navhøyde	112 meter
Rotordiameter	136 meter
Turbintype	Vestas V136
Energi pr sveipet areal	$1020,7 \text{ kWh}/m^2$
Elspotområde	NO3

Her er det benyttet turbintype Vestas V136. Denne er designet for lave til medium vindforhold. Den er dimensjonert for å tåle lave temperaturer, helt ned mot minus  $30^\circ$  som er godt egnet for norske forhold. Turbinen roterer på vindhastigheter mellom 3 m/s og opp til 25 m/s [67].

I maskinhuset på toppen av vindturbinen er det en transformator som omformer spenningen fra 0,72 kV til 33 kV. Denne har en nominell ytelse på 4,7 MVA. Ved maks produksjon fra vindturbin blir transformatoren belastet med 4,2 MW tilsvarende 89% av transformatorytelsen. Vindturbinene på Stokkfjellet samles til en felles krafttransformator for hele parken som har en installert ytelse på 100 MVA. Denne transformerer spenningen fra 33 kV til 132 kV og leverer strøm ut på en separat produksjonslinje mot Nea transformatorstasjon [68].

Figur 18 viser vindturbinenes plassering på Stokkfjellet. Disse ligger innenfor et avgrenset planområde. Vindparken ligger høyt i terrenget, i gode vindforhold.



Figur 18: Vindturbinparken på Stokkfjellet, skjermtutklipp fra NVE Atlas



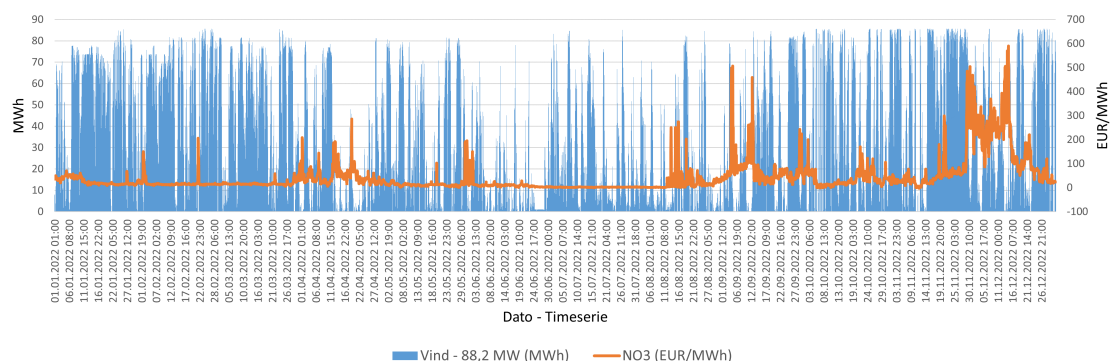
Figur 19: Vindturbiner på Stokkfjellet, foto: TrønderEnergi

## 5.2 Vindkraft - analyse

Grafene fra produksjonen viser at vindkraftproduksjonen er høyest i periodene januar-april, og oktober-desember. Vinterhalvåret er mest gunstig for vindkraftproduksjon. Fordelen her er at det er den tiden med lavest lufttemperatur og tap i forbindelse med varme på komponenter minsker, og at det er høyest vindstyrke. På sommerhalvåret fra

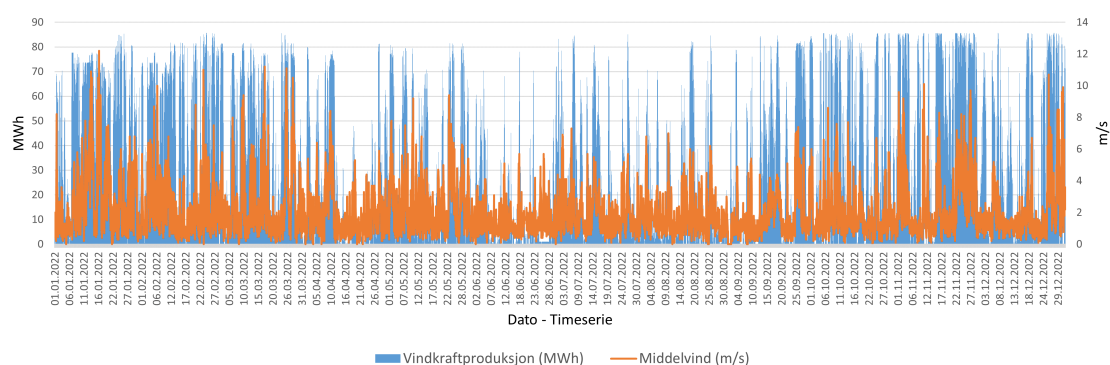


mai til oktober er produksjonen varierende og ujevn. Dette kan finnes i Figur 20. Det kommer også frem at spotpris for 2022 ikke er sammenfallende med produksjon.



Figur 20: Graf produksjon vindkraftverk 88,2MW mot pris(2022)

Figur 21 viser måleverdier for vindhastighet på Stokkfjellet sammen med kraftproduksjon for samme periode, og det kommer frem at produksjon sammenfaller godt med vindstyrke.



Figur 21: Vind i Selbu år 2022 sammenstilt med vindkraftproduksjon [69].

Grafene for kraftproduksjon sammenlignet med vind viser en sammenheng mellom disse. Fra januar til april er det høy og forholdsvis stabil kraftproduksjon. Det avtar på sommeren. Produksjonen tar seg så opp igjen utover september og holder seg stabil ut året med variasjon. Ved å analysere produksjonen vurderes en kombinasjon mellom vind og sol til å passe godt sammen.

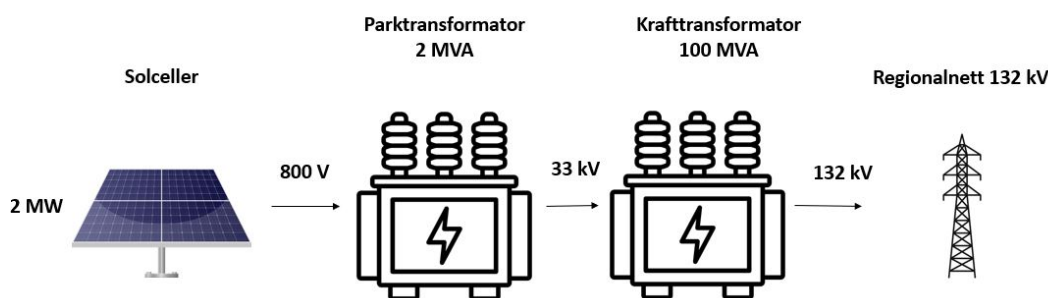
### 5.3 Solkraft på Stokkfjellet

Per i dag eksiterer det ikke solkraft på Stokkfjellet. Det er simulert anlegg på to forskjellige størrelser i PVsyst fra solinnstrålingsdata gitt av Aneo. Solcelleanlegget er tenkt plassert på det samme planområdet som Stokkfjellet vindpark.

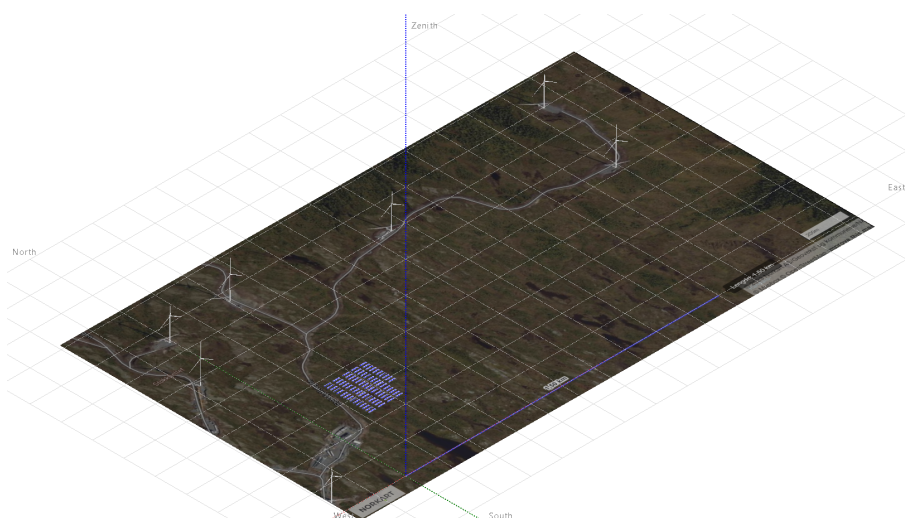
NVE har per i dag kun behandlet en konsesjonssøknad for solkraftverk [27], og solkraftverk er kun konsesjonspliktige dersom nettselskapet må etablere nytt høyspenningsanlegg over 1kV. Dersom solkraft skal monteres på Stokkfjellet bør det derfor tas hensyn til at eksisterende krafttransformator beholdes, og at produksjonen fra ny solkraft sammen med Stokkfjellet vindpark ikke overskrider krafttransformatorens ytelse på 100 MVA. Ikke-konsesjonspliktige anlegg må saksbehandles av ansvarlig instans i kommunen det skal settes opp i, etter plan- og bygningslovens bestemmelser. Lovverket krever per dags dato ikke at det utarbeides en melding, da store solkraftverk er nytt i norsk sammenheng. NVE anbefaler at frivillig melding må vurderes for anlegg med installert effekt over 10 MW og at det alltid fremlegges frivillig melding for anlegg med installert effekt over 30 MW. En melding er en beskrivelse av hva som skal bygges, inkludert en gjennomgang av terrenngrepene og gode kart. Den bør også inneholde de forventede konsekvensene med en utbygging. Med utgangspunkt i NVE sitt oppsett, bør forslag til konsekvensutredningsprogrammet være så stedsspesifikke som mulig [70].

### 5.4 Solkraftverk - analyse

Oppsett i PVsyst for 2 MW solkraftverk er vist i Figur 22 viser hvordan systemet er utformet.

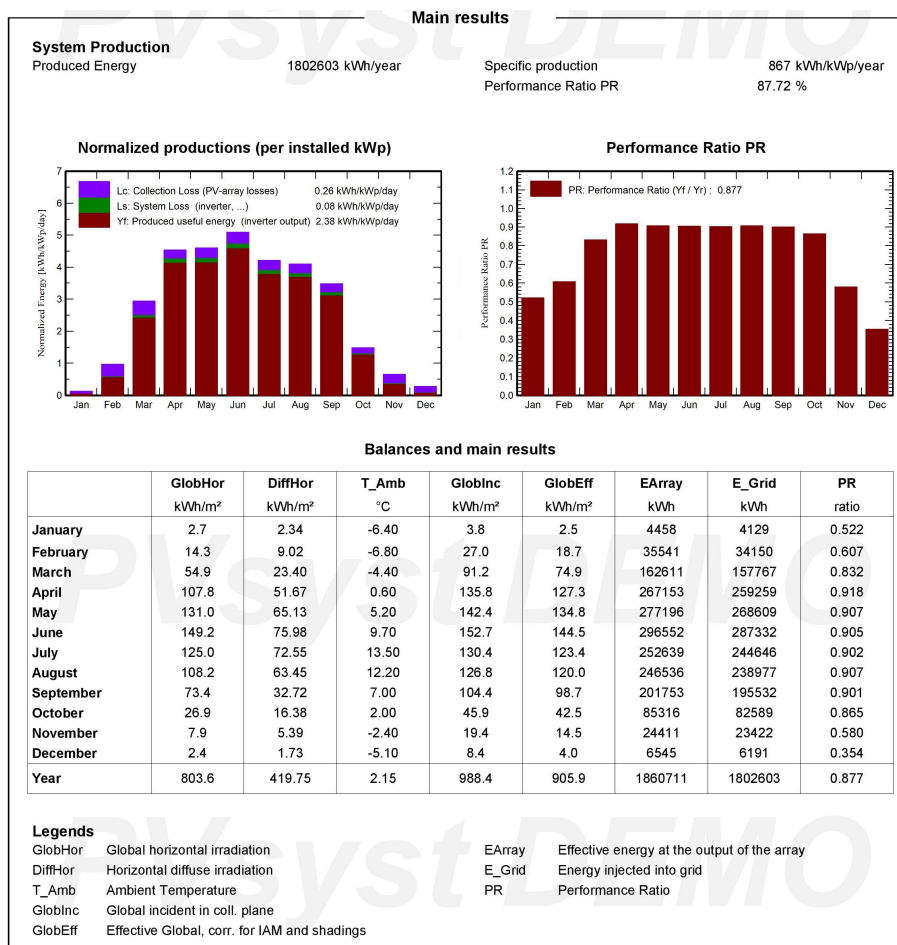


Figur 22: Oppsett av produksjon for 2 MW anlegg



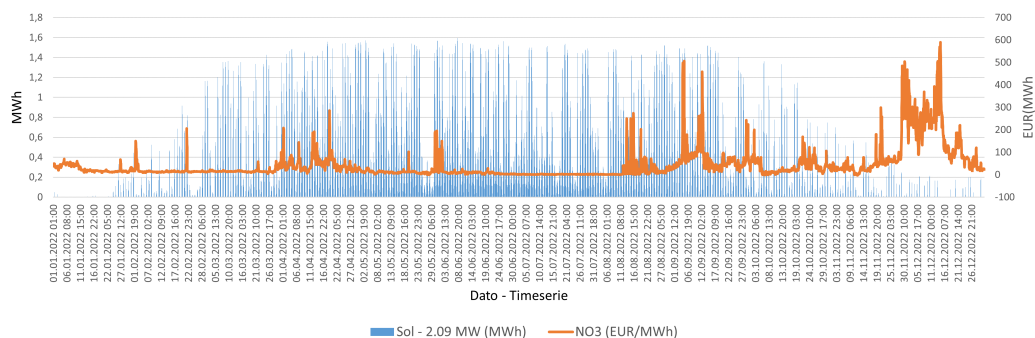
Figur 23: Illustrasjon av 2 MW solcelleanlegg på Stokkfjellet.

Solcelleanlegget for 2 MW er framstilt grafisk ved hjelp av PVsyst. Ut i fra produksjon kan man se at fra midten av februar begynner produksjonen å stige, før den når sin topp i juni, til den begynner å synke til lav produksjon mot desember. Figur 24 viser en oppsummering av simuleringsresultatene, med blant annet produksjon per installerte kWpeak og performance ratioen som beskriver utnyttelsen av sola. Her er månedlig produksjon i tabellform med faktorer som gjennomsnittlig temperatur per måned og solinnstråling.



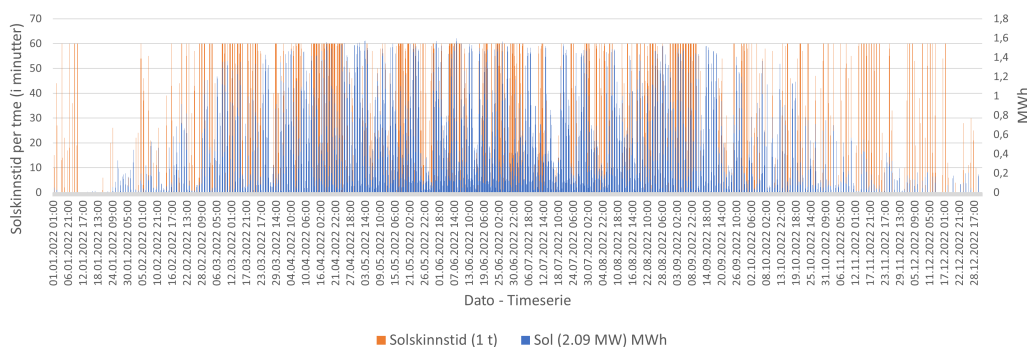
Figur 24: Hovedresultater fra PVsyst etter simulering av 2 MW solcelleanlegg

Produksjon for sol med pris vises på grafen i Figur 25



Figur 25: Produksjon fra solcelleanlegg med 2 MW installert effekt (Simulert i PVsyst) mot pris for NO3 (2022)

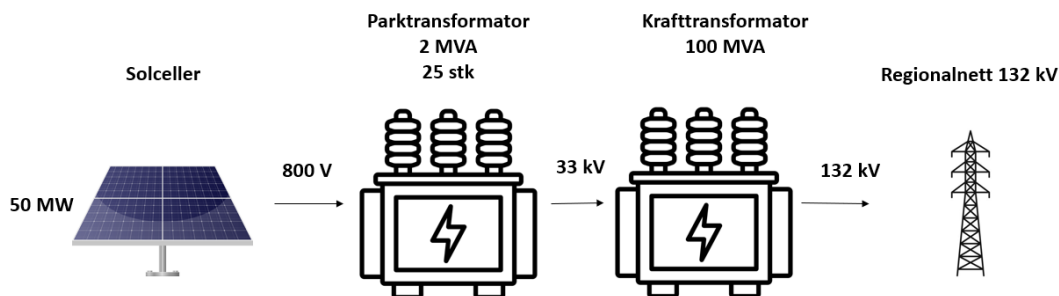
Figur 26 viser kraftproduksjonen fra sola mot målte soltimer for år 2022.



Figur 26: Produksjon fra solcelleanlegg mot målte soltimer

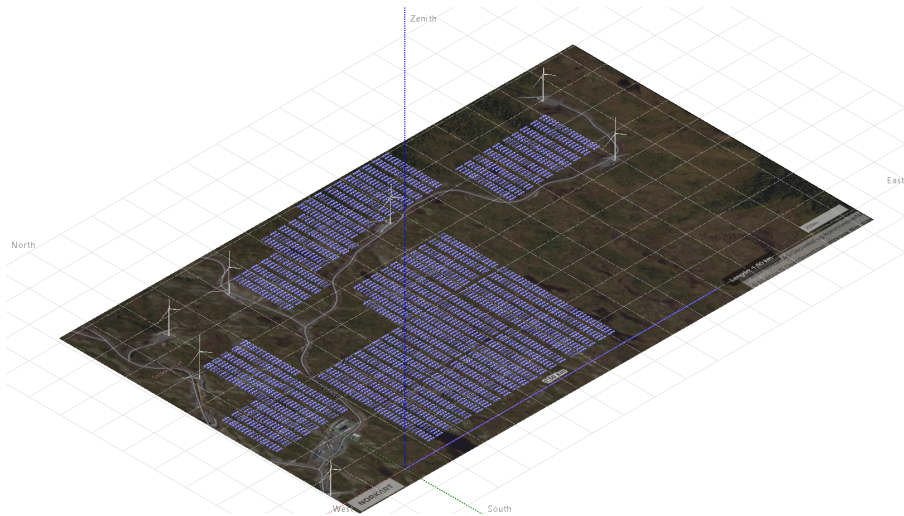
I Figur 25 kommer det frem at kraftproduksjon ikke er sammenfallende med spotprisen, men mer motstående for dette året. I Figur 26 kommer det frem at selv med målte soltimer på vinter, så er det produksjon av solkraft lav. Det kan ha sammenheng med at målestasjon for soltimer er i Trondheim og ikke på Stokkfjellet i Selbu.

Oppsettet av 50 MW vist i Figur 27 viser hvordan systemet er utformet. Solcelleanlegget vil være fordelt på 25 transformatorer som hver har en ytelse på 2 MVA.

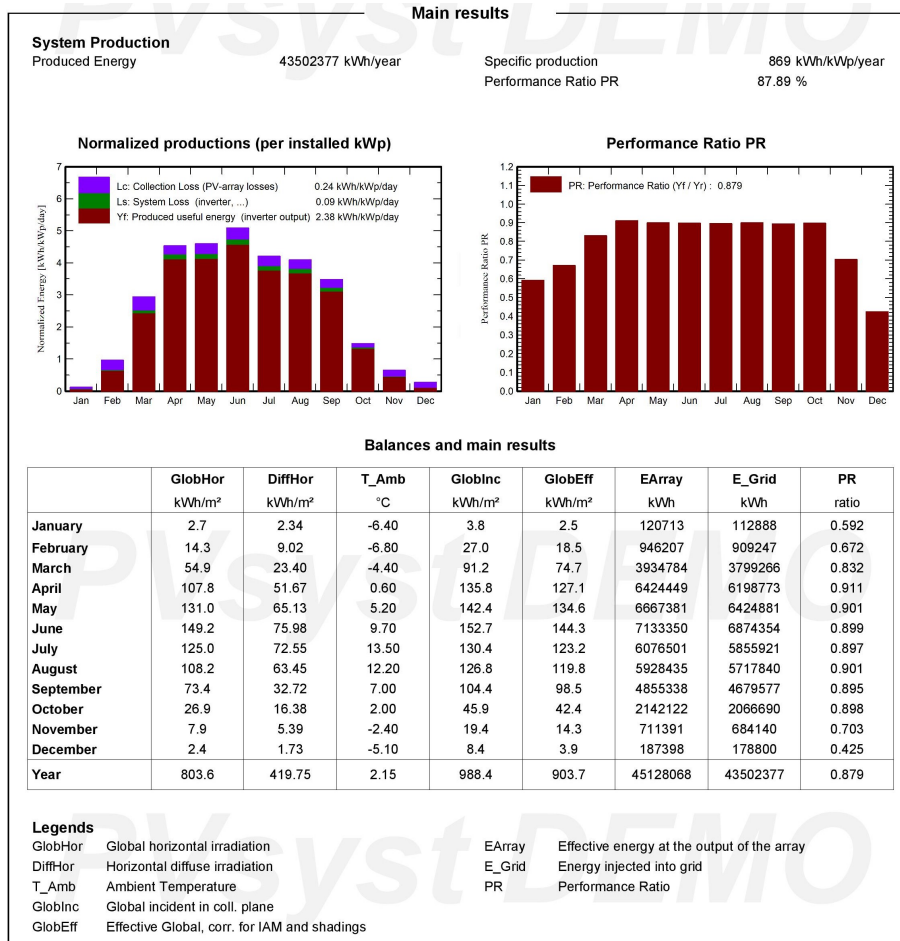


Figur 27: Oppsett av produksjon for 50 MW anlegg

Solcelleanlegget for 50 MW er framstilt grafisk ved hjelp av Excel. Ut fra produksjon kommer det frem at fra midten av februar begynner produksjonen å stige, før den når sin topp i juni, til den begynner å synke til lav produksjon mot slutten av oktober. Figur 29 viser produksjon per installerte kWp og performance ratioen som beskriver utnyttelsen av sola. Den viser månedlig produksjon i tabellform med faktorer som gjennomsnittlig temperatur i måneden og solinnstråling.



Figur 28: Illustrasjon av 50 MW solcelleanlegg på Stokkfjellet.



Figur 29: Hovedresultater fra Pvsyst etter simulering av 50 MW solcelleanlegg

Produksjonen er avhengig av solstyrken og denne vil variere fra år til år. Ut i fra de simuleringene som er foretatt i PVsyst gir det godt datagrunnlag på produksjon og tap i de valgte installasjonene. Solen har mest energipotensial og utnyttes best på sommerhalvåret.

Solcelleanlegget med installert effekt på 50 MWp kan maksimalt levere en effekt på ca 38 MW. Anlegget med en installert effekt på 2 MWp kan maksimalt levere en effekt på 1,6 MW. I Figur 23 og 28 kommer forskjellen på anleggene frem og hvor mye større areal det vil kreves for et anlegg på 50 MWp sol. Anlegg på 50 MWp vil dekke et areal på ca 161 mål mot anlegget på 2 MWp som vil dekke ca 6.75 mål.

## 5.5 Mølnåa elvekraftverk

Selbu Energiverk AS eier elvekraftverket Mølnåa, som er å regne som et småkraftverk med 1.5 MW maksimal ytelse. Det sto ferdig til bruk i mars 2020. Kraftverket produserer når det er tilstrekkelig vannføring i elva. Innsjøen som elva har utløp fra heter Hersjøen. Det er mye myr rundt Hersjøen som holder litt på vannet før det kommer ut i elva, så under regn blir vanntilsiget til Mølnåa noe forsinket. Det gir kraftverket mulighet til å få bedre pris på strømmen de produserer, enn om det hadde vært fjell rundt innsjøen [71].

Kraftverket har en pelton turbin med 4 dyser, og en generator av merket tdps fra India. Spenningen på generatoren er 690 V, som forsynes inn på en transformator med merkeytelse 2 MVA fra produsent ABB. Spenningen transformeres fra 690 V og opp til 22kV, før det sendes inn på distribusjonsnettet [72].



Figur 30: Generatoren i Mølnåa kraftverk.

Inntaket til Mølnåa kraftverk er av typen Coandainntak. Når produksjonen er mellom 0 MW og 1,5 MW, så går alt vannet igjennom coandaristene. Er vannføringen større så vil vannet renne over ristene og nedover elven [71].

Tabell 11: Data om elvekraftverket Mølnåa

Total installert data	1,5 MW
Årsproduksjon	4,3 GWh
Ferdigstilt	Mars 2020
Inntak	Fossekallen Coanda
Turbintype	Pelton 4 dyser
Transformator	ABB 2000kVA
Generator	tdps VTD 130, 1798kVA
Brutto fallhøyde	131.65 m
Energiekvivalent	0.298 kWh/m <sup>3</sup>
Elspotområde	NO3



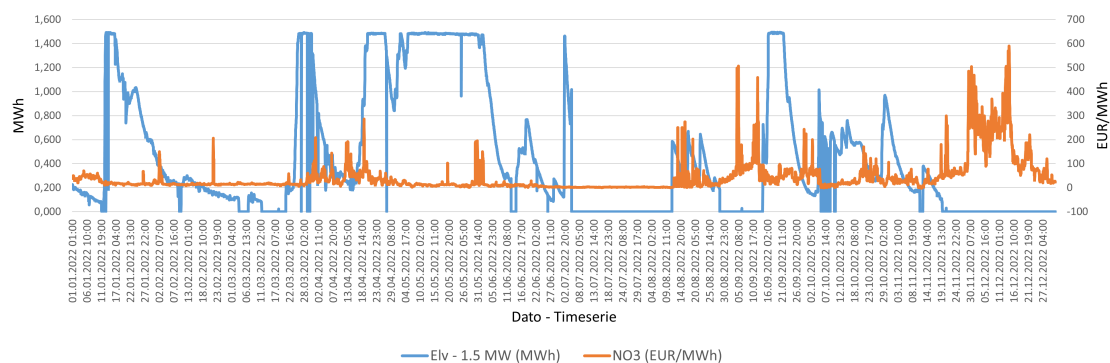
Figur 31: Mølnåa elvekraftverk i Selbu [73].

## 5.6 Elvekraft - analyse

Ut fra produksjonsdata og grafer kommer det at elvekraftproduksjonen er høyest i perioder av året med mest nedbør, vist i Figur 34. I januar, mars og september er det noen dager med god produksjon, men jevnest produksjon finnes i perioden 20.april og ut mai. Perioden med jevnest produksjon sammenfaller med snøsmeltingen. I sommermånedene er det lange perioder uten produksjon, og det gjentar seg også i november og desember.

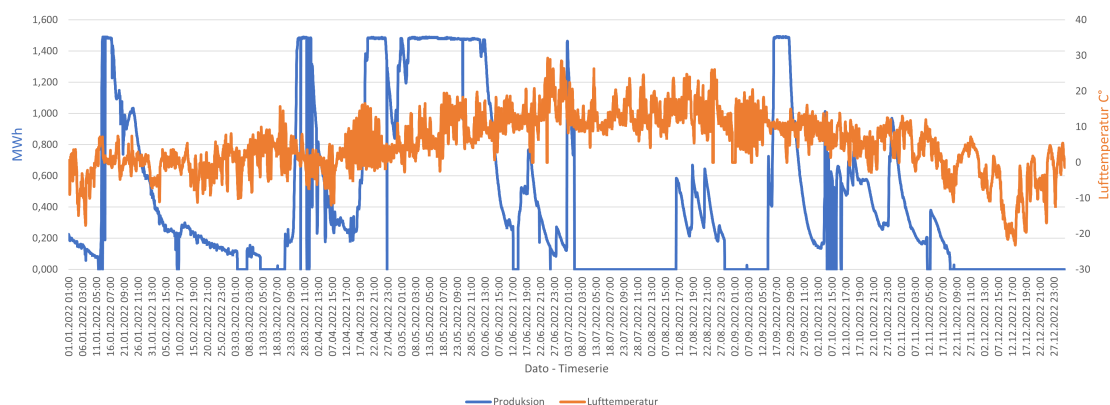
Det kommer frem av resultat i Figur 32 at alle måneder bortsett fra april og mai har perioder med ingen produksjon. Sammenfaller mellom produksjon og spotpris er liten. Det kommer frem at perioder med høy produksjon har lav pris, og perioden på desember uten produksjon har høy spotpris for året 2022.





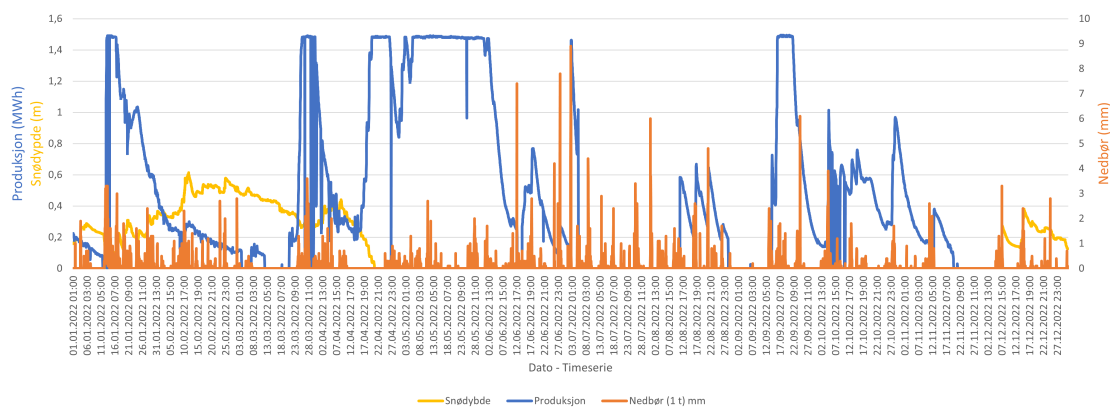
Figur 32: Produksjon fra Mølndaa elvekraftverk mot prissene NO3

I Figur 33 kommer det frem hvilken påvirkning lufttemperatur har mot produksjonen fra elvekraftverket. Denne grafen kan igjen sammenlignes med grafen på Figur 34 for å vise temperatur, nedbør, snømengde med smelting mot produksjonen.



Figur 33: Produksjon og temperatur i Selbu. [69]

I Figur 34 kommer påvirkningen nedbør og snømengde har mot produksjonen fra elvekraftverket fram.



Figur 34: Produksjon fra Mølnåa elvekraftverk mot nedbør og smømengde i Selbu[69]

Erfaringer fra Selbu Energiverk er at ved frost og høy vannføring, så blir produksjonen redusert en periode før vannet finner nye veier i isen som har tildekket inntaket. Dette kan være grunnen til at det på januar, februar og mars går fra 0 W til full produksjon. I november og desember er det minus grader og lite nedbør, og tilsiget forsvinner [72]. Så lenge det er høy nok vannføring produserer aggregatet strøm.

Inntaket har en minstevannsføringsventil og styring, som starter og stopper aggregatet ut fra vannstand i elva, og anlegget kan styre seg selv mellom 0,8-1,5 MW [72]. Det er krav til minstevannsføring i Mølnåa. Pålagt minstevannsføring er 70 liter i sekundet i tidsrommet 01.mai til 30.september og 50 liter i sekundet i tidsrommet 01.oktober til 30.april. På Mølnåa er minstevannsføringen stilt inn til å ligge 5 liter i sekundet over kravet [74].

Selbu Energiverk har inntrykk av at Coanda-inntaket fungerer godt i deres område, da de ikke har hatt problemer med ising eller algevekst og ikke har trengt å bruke tid og penger på rensing av rister i år 2022 [72].

I juni, juli og august er det mye nedbør og tilsig, men lav og til tider ingen produksjon. Grunnet lave strømpriser valgte Selbu Energiverk valgte å stoppe anlegget sommeren 2022. Dette gjorde at kraftverket produserte nesten 1 GWh mindre i år 2022 enn år 2021 [72].

I Tabell 12 kommer produksjonen for tidligere år frem.

Tabell 12: Produksjon i Mølnåa kraftverk for de siste 3 årene

År	Produksjon [GWh]
2022	3,952
2021	4,805
2020	4,198

## 5.7 Nettstruktur

Ved å undersøke nettilknytningen til kraftverkene nærmere, kommer det frem at de er ulike. Begge kraftverk ligger under Tensio TS sitt konsesjonsområde, og de er både eier av distribusjon- og regionalnett i Selbu [75]. Figur 35 viser hvordan NVE har delt inn de tre nettnivåene. Distribusjonsnett (grønn), regionalnett (blå) og sentralnett/transmisjonsnett (rød). Inntegnede linjer i kart, viser kun luftlinjer for området. Selbu har to inngående linjer via regionalnettet på spenningsnivå 132 kV. Eidum - Hersjøen er den nordliggende linjen som er tilknyttet transformatorstasjonen Eidum i Stjørdal. Den andre linjen går sør-østover mot Nea transformatorstasjon.

Stokkfjellet er i dag tilknyttet strømmettet med en 132 kV linje. Denne linjen er direkte tilknyttet Nea transformatorstasjon, og tilhører Aneo. Det er ingen avganger eller splitting av linjen underveis på dette linjestrekket. Produksjonslinjen fra Stokkfjellet vindpark går parallellt med Statnetts sentralnettslinje Nea-Klæbu 420 kV og regionalnettslinjen mellom Hegsetfoss - Nea 132 kV.

Mølnåa kraftverk er tilknyttet 22 kV distribusjonsnett. Nærmeste transformatorstasjoner tilkoblet regionalnettet er Selbu og Hegsetfoss transformatorstasjon. Stokkfjellet og Mølnåa er koblet opp mot to ulike linjer, som er adskilt fra hverandre via Nea transformatorstasjon.



Figur 35: Oversiktsbilde hentet fra NVE Atlas

Gitt nettstrukturen i området rundt Selbu har ikke samspillet mellom kraftverkene så mye å si ettersom de ikke er knyttet sammen. Stokkfjellet vindpark er ikke direkte knyttet til Selbuområdet. Å undersøke sammenhengen av produksjon på de to ulike kraftverkene, med tanke på lastforbruk i Selbu vil ikke være mulig uten en lastflytanalyse for området. Uten egnet programvare og tilgang på data blir det for omfattende til å kunne inkludere i oppgaven.

Med tanke på videre utbygging av kraftproduksjon i Selbu området eller økning av installert effekt i eksisterende kraftverk, vil ikke nettet ha kapasitet til å motta produksjonen. Dette kommer frem i Regional kraftsystemutredning for Sør-Trøndelag 2022-2042 som er publisert september 2022. I kraftsystemutredningen er det utført vurderinger angående mulighet for økning av installert effekt per kommune i Sør-Trøndelag, med hensyn både på tilkobling i distribusjonnettet og regionalnettet [76].

Selbu kommune ligger inne med status: "Ingen kapasitet for tilknytning av ny kraftproduksjon - 0 MW". Begrensningen som ligger til grunn er kraftlinjen Hersjøen-Eidum som er fullt utnyttet, og gjelder både for distribusjon - og regionalnettet. Per idag er det ikke planlagt tiltak for å øke overføringskapasiteten [76].

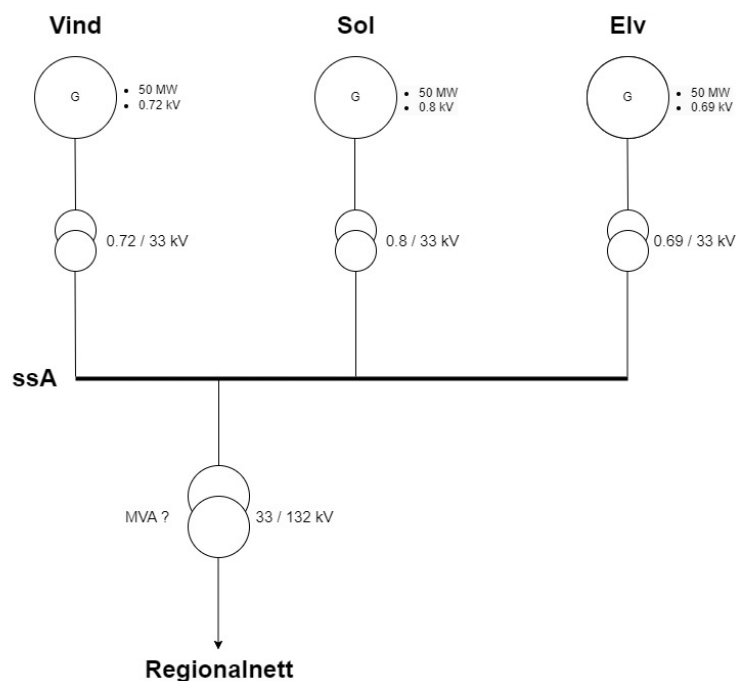
Nea transformatorstasjon ligger i Tydal kommune. Tydal kommune ligger inne med samme status: "Ingen kapasitet for tilknytning av ny kraftproduksjon - 0 MW". Begrensningen for dette området er at transformator Nea 420/132 kV er fullt utnyttet. Planlagt tiltak er at nytt industriforbruk vil gi plass til mer innmating. Det er også mulig at det vil komme ny transformator på 420/132 kV ved utbygging av trinn 3 ved Tydal datasenter [76].

For Aneo og andre kraftprodusenter må disse begrensningene legges til grunn ved videre kraftutbygging i dette området.

## 6 Resultater generell analyse

Dette kapittelet viser resultatene for undersøkelsene i den generelle analysen.

I Figur 36 kommer det frem hvordan systemet er koblet sammen til en felles transformator før det går videre til regionalnettet.



Figur 36: Forenklet enlinjeskjema 150 MW installert effekt

Tabell 13: Produksjonsalternativer årsproduksjon og kapasitetsfaktor

PA	Vind [MW]	Sol [MW]	Elv [MW]	Total effekt [MW]	Transformatorytelse [MVA]	Årlig produksjon [GWh/år]	Kapasitetsfaktor [%]
1.1	50	50	50	150	150	342,8	26,09
1.2	50	50	50	150	130	342,8	26,09
2.1	68,2	68,2	13,64	150,04	150	324,7	24,71
2.2	68,2	68,2	13,64	150,04	120	324,7	24,71
3.1	68,2	13,64	68,2	150,04	150	420,5	32
3.2	68,2	13,64	68,2	150,04	140	420,5	32
4.1	13,64	68,2	68,2	150,04	150	283,4	21,57
4.2	13,64	68,2	68,2	150,04	130	283,4	21,57
5.1	107	21,4	21,4	149,8	150	435,7	33,2
5.2	107	21,4	21,4	149,8	140	435,7	33,2
6.1	21,4	107	21,4	149,8	150	220,5	16,81
6.2	21,4	107	21,4	149,8	120	220,5	16,81
7.1	21,4	21,4	107	149,8	150	370,9	28,26
7.2	21,4	21,4	107	149,8	140	370,9	28,26

I PA 1 er installert effekt på de tre kraftverkene fordelt likt, med 50 MW på hver og en samlet installert effekt på 150 MW. Av Tabell 13 finnes at PA 1 gir ut en samlet årsproduksjon på 342,8 GWh i året, og en kapasitetsfaktor på 26,09%.

I PA 2 er installert effekt på vindkraft og solkraft på 45,5 % av 150 MW hver og elvekraft er på 9 %. Av Tabell 13 finnes at PA 2 gir ut en samlet årsproduksjon på 324,7 GWh i året, og en kapasitetsfaktor på 24,71%.

I PA 3 er installert effekt på vindkraft og elvekraft på 45,5 % av 150 MW hver og solkraft er på 9 %. Av Tabell 13 finnes at PA 3 gir ut en samlet årsproduksjon på 420,5 GWh i året, og en kapasitetsfaktor på 32,00%.

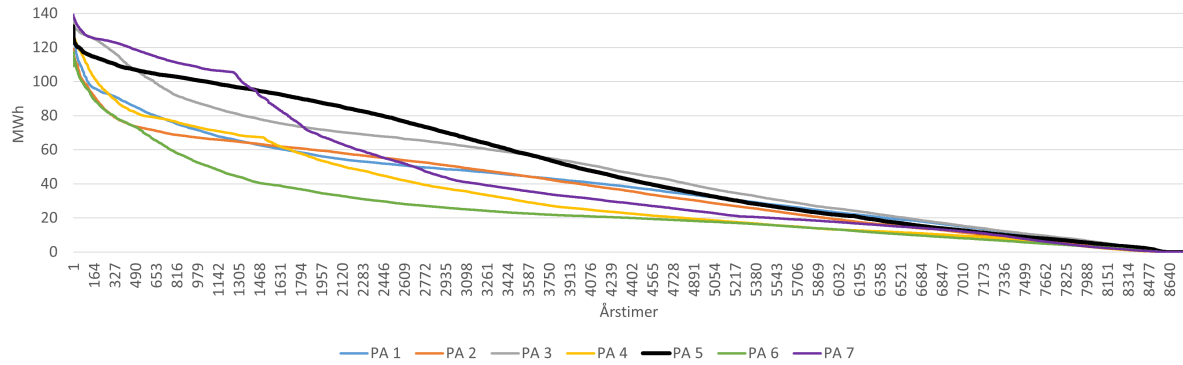
I PA 4 er installert effekt på solkraft og elvekraft på 45,5 % av 150 MW hver og vindkraft er på 9 %. Av Tabell 13 finnes at PA 4 gir ut en samlet årsproduksjon på 283,4 GWh i året, og en kapasitetsfaktor på 21,57%.

I PA 5 er installert effekt på solkraft og elvekraft på 14,3 % av 150 MW hver og vindkraft er på 71,4 %. Av Tabell 13 finnes at PA 5 gir ut en samlet årsproduksjon på 435,7 GWh i året, og en kapasitetsfaktor på 33,20%.

I PA 6 er installert effekt på vindkraft og elvekraft på 14,3 % av 150 MW hver og solkraft er på 71,4 %. Av Tabell 13 finnes at PA 6 gir ut en samlet årsproduksjon på 220,6 GWh i året, og en kapasitetsfaktor på 16,81%.

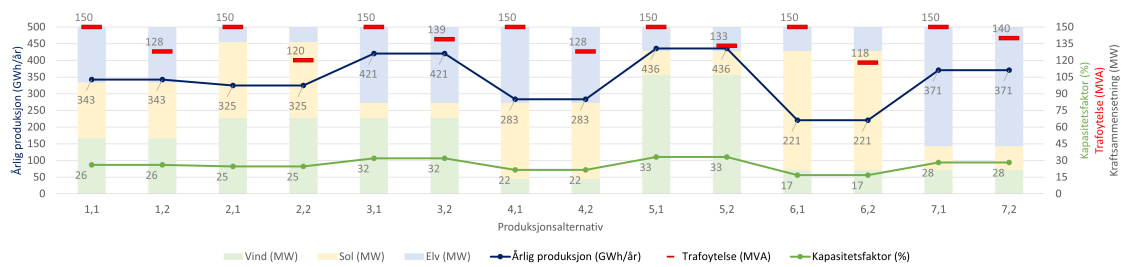
I PA 7 er installert effekt på vindkraft og elvekraft på 14,3 % av 150 MW hver og solkraft er på 71,4 %. Av Tabell 13 finnes at PA 7 gir ut en samlet årsproduksjon på 370,9 GWh i året, og en kapasitetsfaktor på 28,26 %.

Grafen på Figur 37 framstiller produksjonsalternativene i Tabell 13 i en varighetskurve. Den viser produksjonstimer per produksjonsalternativ sortert etter størrelse.



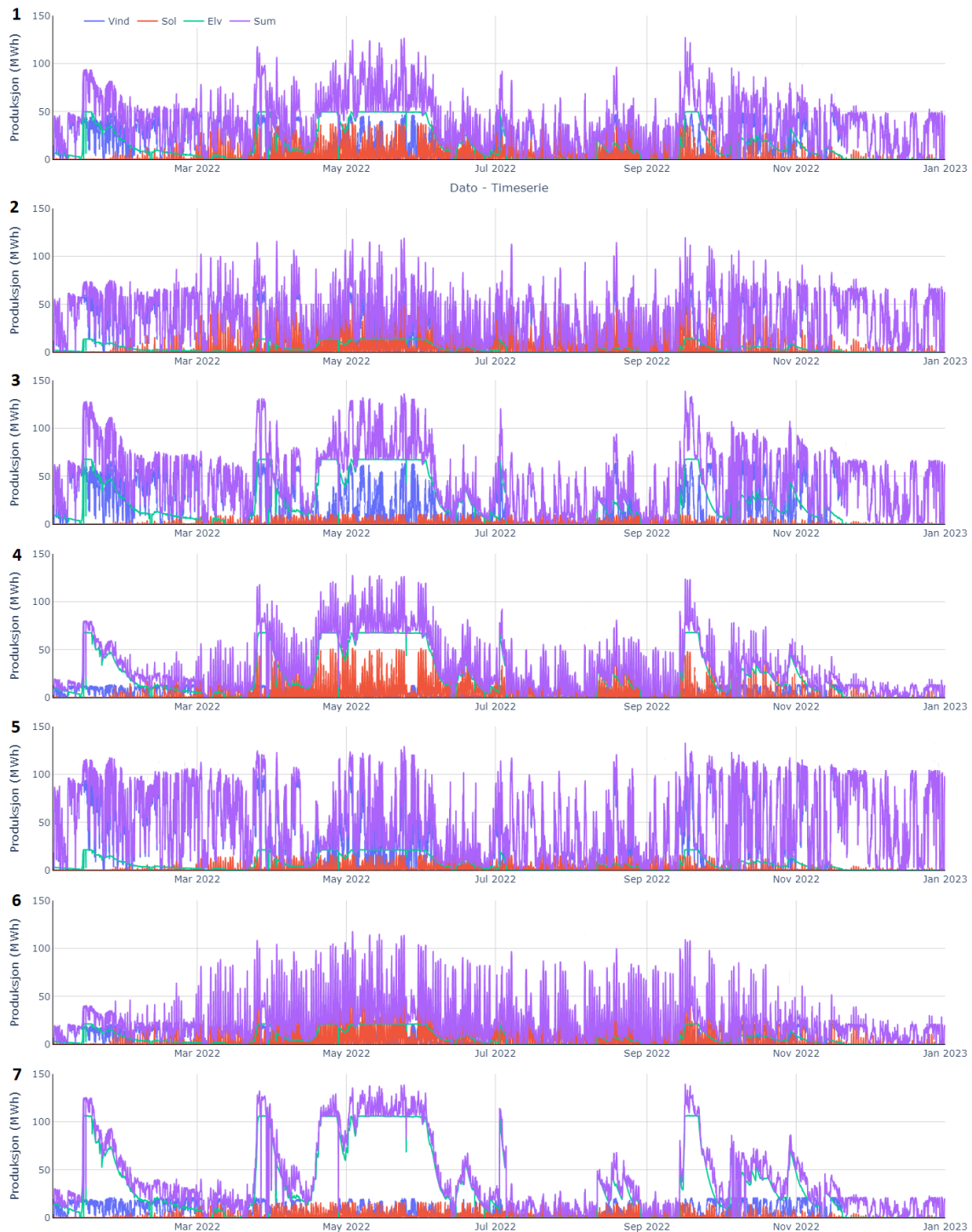
Figur 37: Varighetskurve for produksjonen for PA 1 til 7.

Figur 38 viser produksjonsalternativene i Tabell 13. Her vises variasjonen i produksjonspotensialet basert på valg av transformatorstørrelse for de 7 produksjonsalternativene. Den totale installerte effekten er lik for alle produksjonsalternativ. Hvert produksjonsalternativ vurderes mot to forskjellige trafostørrelser.



Figur 38: Årsproduksjon med installert effekt og tranformatorstørrelse for hvert produksjonsalternativ

Figur 39 viser kurven for årsproduksjon for hvert av kraftverkene, samt total årsproduksjon, for de forskjellige produksjonsalternativene.



Figur 39: Produksjon for PA 1 til 7



Ved å analysere grafene for de ulike produksjonsalternativene i Figur 37 og 38 kommer det frem at vind gir høyest produksjon og kapasitetsfaktor totalt, og dermed får PA med høyest installert effekt av vindkraft også den høyeste kombinerte totale produksjon.

Solkraftanlegget har en positiv innvirkning på den totale produksjonen og bidrar med å jevne ut produksjonen. Produksjonen med de to andre kraftverkene blir mer stabil, og bunnproduksjon løftes uten å påvirke topp-produksjonen særskilt. Figur 37 og 38 viser at en lik fordeling av effekt for solkraft og vindkraft gir en lavere årsproduksjon og kapasitetsfaktor enn om vindkraft ligger høyere. Det vurderes til at solkraft har lavere kapasitetsfaktor en vindkraft grunnet mindre produksjon på natt og vinterhalvår.

Av Figur 37 og 39 kommer det frem at elvekraft bidrar til en mer ujevn produksjonskurve. Produksjonen viser at kraftverket enten produserer mye eller ned mot null. Elvekraftverket er med på å trekke opp den totale produksjonen, og det finnes av Figur 38 at høyere andel av elvekraft enn solkraft bidrar til en høyere total årsproduksjon. Med data fra år 2022 er elvekraftverket nedstengt over lang tid på sommer grunnet lave strømpriser som vil påvirke det totale årsresultatet.

PA 3 og 5 skiller seg ut som sammensetningene som gir høyest produksjon og kapasitetsfaktor, hvorav PA 5 er den som ligger høyest med en kapasitetsfaktor på 33,2%. I dette alternativet er vindkraft satt med 71,4% av total produksjon, og solkraft og elvekraft er fordelt likt på 14,3%. Det viser at vindkraftverket skiller seg ut som kraftverket som har høyest produksjon av alle tre, og dermed får den høyeste kapasitetsfaktoren.

PA 3 har en lavere produksjon enn PA 5 med 15,1 GWh i året, og dermed blir kapasitetsfaktoren også mindre. PA 3 har lik fordeling av vindkraft og elvekraft med 45,5% av total installert effekt hver. Elvekraft skiller seg ut fra de andre kraftverkene med å ha en stabil produksjon, som enten viser seg å være full eller ned mot ingen produksjon.

PA 3 blir eliminert som et alternativ for forbedring når varighetskurve og produksjonsgrafer sammenlignes. Med høyere installert effekt av elvekraft, finnes det av Figur 39 og 37 at produksjonsflyten blir mer ujevn og dermed ikke møter kriteriet for å undersøkes videre.

PA 1 med like høy installert effekt på alle kraftverk utgår også på grunn av lavere totalproduksjon og kapasitetsfaktor, samt en mer ujevn produksjonskurve enn PA 5. Det kommer frem av Figur 39 og 37. Det samme gjelder PA 4 og PA 7. Av disse tre produksjonsalternativene ligger PA 7 med høyest total produksjon og en kapasitetsfaktor på 28,26%, og PA 4 med lavest kapasitetsfaktor på 21,56%. Gjennomgående for disse alternativene er at installert effekt på elvekraft settes som høy, og dette skaper en mer ujevn produksjonskurve.

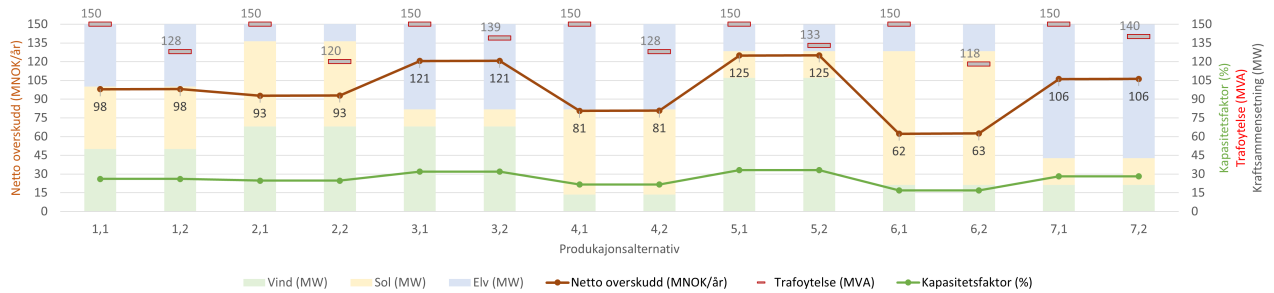
Figur 39 og 37 viser at PA 6 har en jevnere produksjonskurve. Med lav installert effekt på vindkraft og elvekraft på 14,3% og solkraft med høy installert effekt på 71,4%, så kommer denne alternativet ut med den laveste totalproduksjon av alle og en kapasitetsfaktor på kun 16,8%. Ut av dette alternativet kan det finnes at solkraft gir en god bunnproduksjon uten å heve toppen, men er ikke stor nok til å stå alene med høy produksjon.

PA 2 har lik installert effekt på vindkraft og solkraft på 45,5% av totalproduksjon, som gir en jevnere samlet produksjon av alle tre kraftverkene. Av Figur 39 og 37 finnes det at PA 2 har en jevnere produksjon enn PA 5. Men totalproduksjon og kapasitetsfaktor kommer som tredje laveste, og elimineres for videre undersøkelse.

PA 5 har en høy andel vindkraft på 71,4% , og like stor produksjon på solkraft og elvekraft, som ga den høyeste produksjonen og kapasitetsfaktoren. Av Figur 39 og 37 kommer det frem at PA 5 har en jevn produksjon, og kommer ut som produksjonsalternativet som egner seg best til å undersøkes videre.

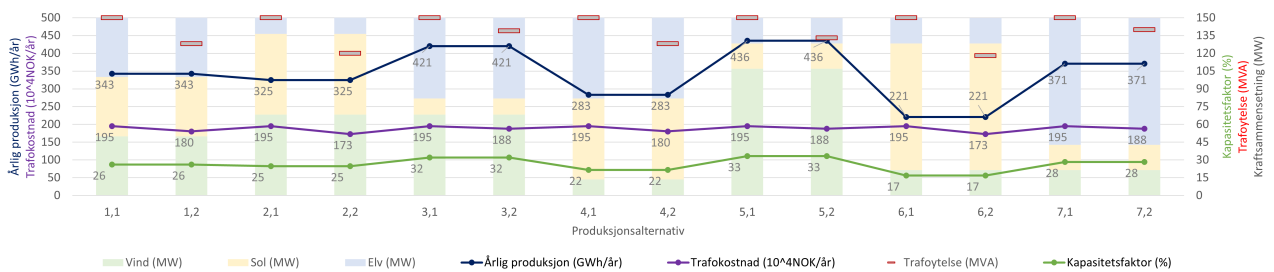
## 6.1 Kostnad for transformator mot inntekt fra kraftsalg

I grafen på Figur 40 finnes variasjonen av netto overskudd i årlig kostnad mot årlig inntekt fra kraftsalg for de forskjellige produksjonsalternativene med forskjellig transformatorstørrelser.



Figur 40: Generell analyse - Netto overskudd og trafoytelse for PA 1 til 7.

I grafen på Figur 41 finnes nøkkeltallsindikatorerne med tanke på de viktigste faktorene for denne oppgaven. Det er ønskelig med høy årsproduksjon og kapasitetsfaktor for kraftverket og et høyt netto overskudd. PA 3 og PA 5 skiller seg ut som de beste alternativene. Av Figur 37 kommer det frem at PA 5 har en jevnere produksjonskurve enn PA 3.



Figur 41: Nøkkeltall for generell analyse

For hver PA er det regnet på én trafoytelse lik installert effekt (PA x.1) og én trafoytelse lik produksjonsalternativets toppproduksjon (PA x.2). Av Figur 40 og 41 kommer det frem at forskjellen på transformatorvalg 1 og 2 varierer for de forskjellige produksjonsalternativene. For PA 6.1 og PA 6.2 er differansen på transformatorstørrelsen 30 MVA, mens for PA 5.1 og 5.2 var differansen kun 10 MVA.

Tapene vil være større på den største transformatoren. Videre vil temperatur påvirke trafoens levetid. Er det varmt og dårlig kjøling vil oljtemperaturen stige, som fører til en redusert levetid. I 2022 var det cut-off på produksjon på både vindkraftverket og elvekraftverket på sommeren, når temperaturene var høyest, så for dette året oppstod det ikke maksimal produksjon når det var dårligst forhold for krafttransformatoren. Dersom

transformatoren blir hardt belastet ved høye lufttemperaturer kan det være mer sannsynlig at størrelsen på transformatoren vil ha en betydning i forhold til driftstemperatur og lengre levetid. Ut i fra dette må det vurderes hvilken faktor krafttransformatoren skal dimensjoneres etter. Her vil kostnad spille en viktig rolle og påvirke resultatet.

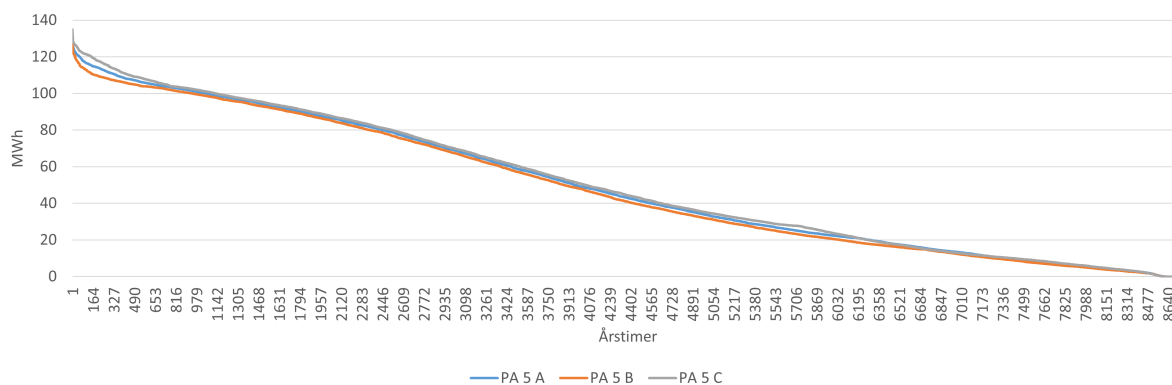
Etter å ha vurdert netto overskudd for de to ulike transformatoralternativene for hver PA, kommer det frem av Figur 41 at det utgjør liten kostnadsforskjell å velge en transformator med en lavere installert ytelse.

## 6.2 Generell analyse - forbedring av PA 5

Tabell 14: Produksjonsalternativer årsproduksjon og kapasitetsfaktor forbedring av PA 5

PA	Vind [MW]	Sol [MW]	Elv [MW]	Total effekt [MW]	Trafoytelse [MVA]	Årlig produksjon [GWh/år]	Kapasitetsfaktor [%]
5 A1	107	21,4	21,4	149,8	150	435,7	33,2
5 A2	107	21,4	21,4	149,8	140	435,7	33,2
5 B1	107	28	15	150	150	424,6	32,31
5 B2	107	28	15	150	130	424,6	32,31
5 C1	107	15	28	150	150	447,4	34,05
5 C2	107	15	28	150	140	447,4	34,05

Grafen i Figur 42 framstiller Tabell 14 i en varighetskurve. Den viser produksjonstimer per alternativ av PA 5 sortert etter størrelse.



Figur 42: Varighetskurve for produksjonen for produksjonsalternativ 5

I Figur 43 kommer det frem at produksjonstoppene ligger jevnt over hele året, men jevnest produksjon ved lav produksjon, bunnproduksjon, oppnås når elvekraft og solkraft produserer samtidig i mars, april og mai.

Av Tabell 14 finnes at PA 5 A er det samme som PA 5, med vindkraft på 71,4% og sol- og elvekraft er like store på 14,3 % av total installert effekt. Den har en total årsproduksjon

på 435,67 Wh og kapasitetsfaktor på 33,2%, og som vist i Figur 42 havner midt mellom PA 5 B og PA 5 C.

PA 5 B kommer frem av Tabell 14 og Figur 42 som alternativet med lavest totalproduksjon på 424,6 GWh og en kapasitetsfaktor på 32,31%. Solkraft ble økt fra 14,4% til 18,7% og elvekraft ble senket til 10% av total installert effekt på 150 MW.

Figur 43 og Figur 42 viser at alternativ B har en like jevn produksjonskurve, men det er færre timer med topp produksjon. Med høyere solkraft kan det finnes at bunnproduksjon er tettere på vår og sommer, men i og med at solkraft ikke produserer på natt, og lite i vinterhalvåret, får alternativet en lavere total produksjon enn alternativ A og C som har høyere effekt av elvekraft.

PA 5 C er alternativet med høyest totalproduksjon på 447,4 GWh og en kapasitetsfaktor på 34,05%, som kommer frem av Tabell 14 og Figur 42. Installert effekt på solkraft er senket til 10% og på elvekraft er den økt til 18,7%.

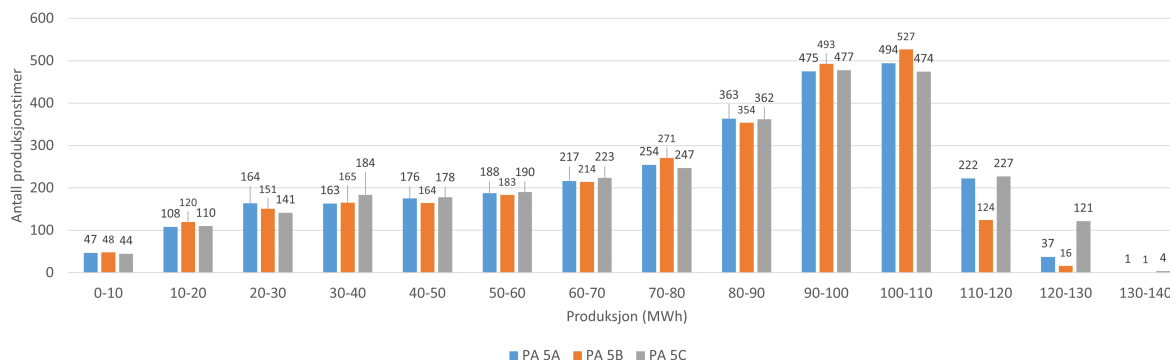
Av Figur 43 og Figur 42 vurderes det at alternativet med minst solkraft, gir høyest totalproduksjon. PA 5 C har en mer ujevn produksjonstrend, som vurderes å komme av at elvekraftproduksjon har ujevn produksjon.



Figur 43: Produksjon for produksjonsalternativ 5A, 5B og 5C

### 6.2.1 Oversikt produksjonstimer

Figur 44 viser en oversikt over antall produksjonstimer innenfor intervaller på 10 MW for å vurdere produksjonsprofilen for PA 5 A, B, og C. Ut fra Figur 44 kommer det frem hvor mange timer hvert alternativ produserer innen hver sone.



Figur 44: Produksjonstimer for ulike produksjonsintervall

Av Figur 42 og Figur 44 kan det finnes at i produksjonssoner fra 1-10 MWh til 90-100 MWh, så er produksjonsalternativene ganske like.

PA 5 A med like stor installert effekt på solkraft og elvekraft har færre produksjonstimer i sonen 10-20 MWh, 30-40 MWh og 90-100 MWh. Fra sonene 20-30 MWh og frem til sonen 70-80 MWh ligger produksjon meget jevn, men med en stigning fra 164 til 254 timer i løpet av året. I sonen 80-90 MWh, 90-100 MWh og 110-120 ligger produksjonstimerne på PA 5 A og PA 5 C nesten likt, mens PA 5 A har noen flere timer i sonen 100-110 MWh. Fra sonen 110-120 MWh så faller produksjonstimerne kraftig for både PA 5 A og PA 5 C.

I sonen 120-130 MWh så ligger timene for både PA 5 A og PA 5 B langt under PA 5 C. Produksjonshoppet som kommer frem i Figur 42 gjenspeiler det som vises av produksjonen i sone 120-130 MWh i Figur 44.

I Figur 44 kommer det frem at PA 5 B med 8,7% mer solkraft enn elvekraft, har flere produksjonstimer i sonene 0-10 MWh, 10-20 MWh, 70-80 MWh og 100-110 MWh. Fra sonene 10-20 MWh og frem til 60-70 MWh ligger produksjon nesten jevn, men med en stigning fra 120 til 214 timer i løpet av året.

Det er først ved produksjonszone 110-120 MWh og 120-130 MWh det kommer av Figur 44 og 42 hvorfor PA 5 B kommer ut som alternativet med lavest totalproduksjon, da det ligger langt under PA 5 A og PA 5 C. Det kan komme av at PA 5 B er alternativet med høyest installert effekt av solkraft, og mister flere produksjonstimer på natt.

PA 5 C med 8,7% mer elvekraft enn solkraft har flere produksjonstimer i sonene mellom 30-70 MWh, men blir liggende under PA 5 A og PA 5 B i 0-10 MWh og 60-110 MWh. Mer ujevn bunnproduksjon kan forklares med høyere installert effekt av elvekraft enn de

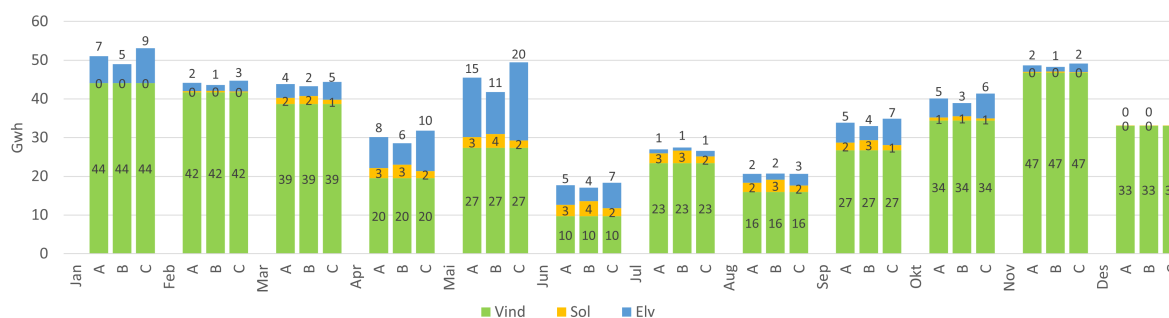
andre, da elvekraft tidligere er funnet å være produksjonsformen som har en mer ustabil produksjon. I Figur 44 og 42 kommer det frem at PA 5 C er alternativet med flest timer høy produksjon i sonen 120-130 MWh, og høyest totalproduksjon.

I Figur 44 kommer det frem at alternativ PA 5 B er alternativet som ligger med høyest produksjon i sonene med flest produksjonstimer. PA 5 C kommer ut med høyest totalproduksjon, da det er alternativet som har flest produksjonstimer i sonene med høyest produksjon fra 110-130 MWh.

Sonene med færrest produksjonstimer finnes av Figur 44 til å være sonene med produksjon mellom 0-10 MWh og 130-140 MWh. Der er det lite forskjell mellom produksjonsalternativene i disse sonene.

## 6.2.2 Oversikt produksjon årstider

For produksjonsalternativene sammenstilles en graf som viser totalproduksjon for hvert alternativ per måned i løpet av et år. Ved å undersøke produksjonsoversikt i Figur 45 kommer det frem hvilke måneder i året som har lav og høy produksjon. Gjennomgående kommer det frem at alle alternativene produserer likt i de fleste måneder, men PA 5 C med høyere elvekraft enn solkraft produserer mer i månedene januar, april og mai.



Figur 45: Månedlig produksjon fordelt på vind-, sol- og elvekraft.

Det forklares nærmere i Figur 45 hvor hvert alternativ deles opp i produksjon per kraftverk. Der kommer det frem at månedene med høyest produksjon fra elvekraft er januar, april og mai.

Juni kommer frem som måneden hvor produksjon er på det laveste, og januar som måneden hvor produksjon er på det høyeste. Figur 45 viser at høy totalproduksjon er samsvarende med høy produksjon av vindkraft. I desember ligger alle tre alternativer helt likt, og det kommer frem at eneste produksjon i denne måneden er vindkraft.

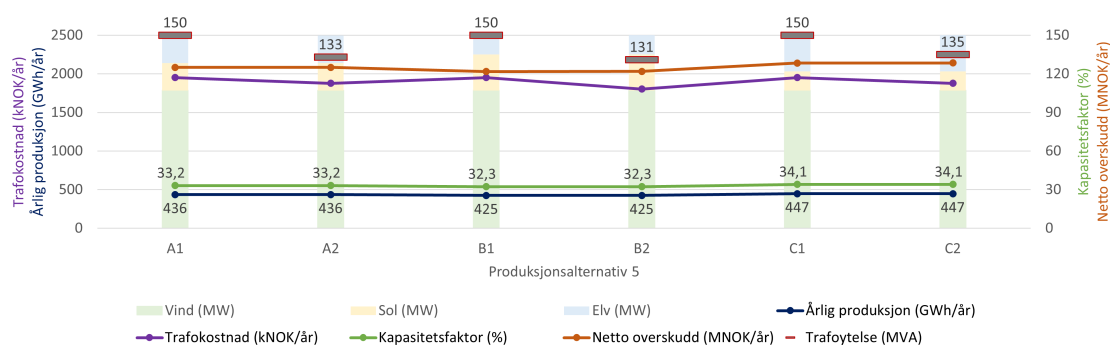
Solkraft bidrar til produksjon i månedene mellom mars og oktober, men med installert effekt på mellom 15-28 MW, så utgjør ikke det så mye av totalproduksjon. PA 5 B har

høyest effekt av solkraft med 28 MW og på det meste utgjør dette 2 GWh forskjell ned til alternativ PA 5 C som har 15 MW pr måned.

Måneden med høyest elvekraftproduksjon er mai, og da utgjør forskjellen mellom PA 5 B og PA 5 C 9 GWh.

### 6.2.3 Transformatorvalg

Figur 46 viser kapasitetsfaktor til produksjonsalternativene med inntekt, netto overskudd og produksjon. Denne inntekten er basert på produksjon ganget med en gjennomsnittlig strømpris. Kostnaden er beregnet som et terminbeløp i året av transformatorens totale sum.



Figur 46: Produksjon, trafokostnad, kapasitetsfaktor, netto overskudd og trafoytelse for kraftverkene

Det vises at trafokostnaden for en trafo dimensjonert etter toppproduksjonen er noe lavere enn kostnaden for trafo dimensjonert etter installert effekt. Men sammenlignet med netto overskudd utgjør denne differansen lite, og det har ingen påvirkning på kapasitetsfaktor da begge transformatorene er dimensjonert til å håndtere toppproduksjonen.



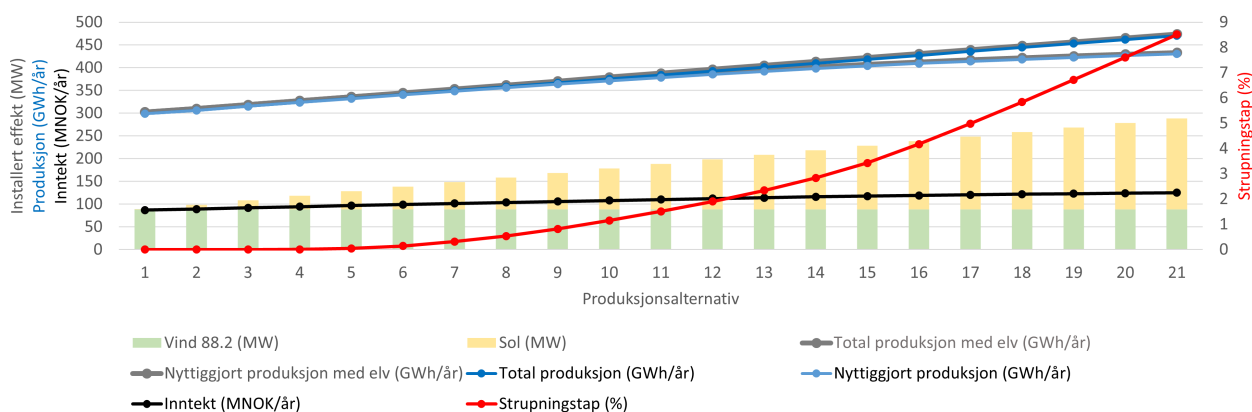
## 7 Resultater case-studie Stokkfjellet

Dette kapittelet viser resultatene for undersøkelsene av case-studiet Stokkfjellet.

Tabell 15 i vedlegg, viser den installerte effekten for vindkraftverket med en gradvis økning av installert effekt av solkraft i intervaller på 10 MW fra 1 MW til 200 MW. Tabellen beskriver total produksjon og produksjonstap for kraftverk ut fra økning av installert solkraft.

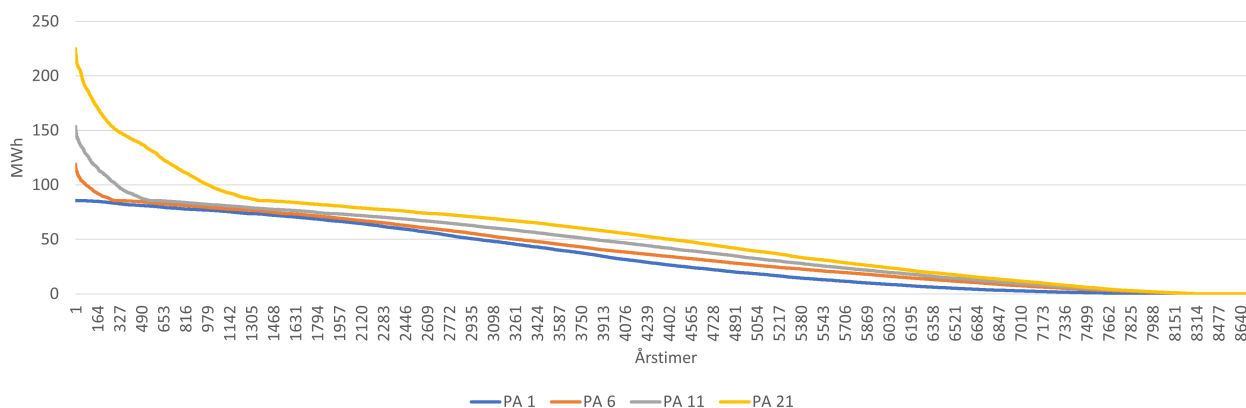
I Figur 47 visualiseres nyttiggjort og total produksjon av elvekraftverket som en grå linje bak den blå linjen for samproduksjon av vind- og solkraft. Det kommer frem at elvekraftverket utgjør lite på den totale produksjonen.

Figur 47 beskriver kombinert årsproduksjon for Stokkfjellet vindkraftverk med installert solkraftverk i økende størrelse. Dette viser økningen i nyttiggjort- og totalproduksjon, samt "strupningstap" ved transformatorytelse på 100 MVA.



Figur 47: Produksjonsalternativ med økende andel solkraft. Produksjon, strupningstap og inntekt for hvert produksjonsalternativ.

Figur 48 viser varighetskurve for PA 1 hvor sol er 1 MW, PA 6 hvor sol er 50 MW, PA 11 hvor sol er 100 MW og PA 21 hvor sol er 200 MW installert effekt. Varighetskurvene er formmessige like, men multiplisert med en skaleringsfaktor i form av solkraftverkstørrelsen.



Figur 48: Varighetskurve for fire av produksjonsalternativene.

I Tabell 15 og Figur 47 finnes de ulike kombinasjonene med installert effekt og tap i produksjon. I PA 1 med 1 MW og opp til PA 3 med 30 MW installert solkraft vil produksjon komme innenfor kapasiteten til transformator, og minimal struping på 0,01% av solkraft vil forekomme. Dette gir en årlig tilleggsproduksjon for Stokkfjellet vindpark fra 297,7 GWh til 340,4 GWh med solkraft i året totalt. PA 7 med installert solkraft på 60 MW ligger under 0,5% i tapt produksjon fra struping, og har en økning på 50,7 GWh med installert solkraft.

Når den installerte effekten på solparken går fra PA 6 med 50 MW installert solkraft og opp til PA 11 med 100 MW øker den tapte produksjonen til 1,52%. Med solkraft øker den nyttiggjorte produksjon med 80,44 GWh.

Ved PA 16 er installert solkraft 150 MW, og årlig tapt produksjon stiger til 4,17%. Nyttiggjort produksjon øker til 409,3 GWh i året, og solkraftproduksjon har bidratt med en økning på 111,6 GWh i året. Men fra PA 13 med 120 MW installert solkraft kan det finnes av Figur 47 at nyttiggjort produksjon begynner å flate ut i forhold til den stigende totalproduksjon.

Av Figur 47 kommer det frem at ved PA 21 med 200 MW installert solkraft er årlig produksjonstap kommet opp mot 8,51%. Det kommer også frem av linjen for strupningstap som eksponensielt øker fra PA 7 med 60 MW til PA 21 med 200 MW av solkraft. Linjen for nyttiggjort produksjon i GWh i året flater ut, som viser at økning i produksjon med installert solkraft flater ut når strupningstapet øker. Ved 200 MW finnes at total nyttiggjort produksjon er på 430,2 GWh i året, som tilsvarer en økning på 132,5 GWh i året med installert solkraft. Tapt produksjon av strupning er nå på 40 GWh i året.

## 8 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres usikkerheter og pålitelighet rundt undersøkelse og dataanalyse i rapporten. Etikkspørsmålet rundt uregulerbare kraftverk blir diskutert.

### 8.1 Usikkerhet dataanalyse

For vind er det brukt målte verdier i timeserier. Disse blir skalert og brukt i en generell analyse som undersøker samspillet mellom kraftverkene. Vindparken var nedstengt på sommeren 2022 grunnet lave strømpriser. Ved å erstatte målte vindkraftdata med simulerte AI-data for perioden vil det oppstå usikkerhet rundt realismen til datasettet.

For soldata er det gjort simuleringer i PVsyst som gir ut kraftproduksjon pr time over et år. Dette er simulerte verdier, og det vil være usikkerhet rundt hvor reelle verdiene vil være. Det omregnes simulerte data fra 50 MW til 1 MW, for så å skalere til ulike effekter.

For elvdata er brukt målte verdier i timeserier. De er skalert opp til andre verdier av installert effekt. På grunn av lave strømpriser valgte kraftverket å stenge ned produksjonen i enkelte tidsrom i løpet av sesongen. Dette gir en svakhet i datasettet da produksjonsprofilen ikke gjenspeiler kraftpotensialet i Mølnåa. AI-data eksisterer ikke for Mølnåa kraftverk.

For alle datasett som skaleres vil det være usikkerhet knyttet til hvor representative de nye skalerte data vil være. Tapsfaktorer forandrer seg med tanke på størrelse på anlegget som kan påvirke produksjon.

For å beregne inntekt og kostnader for kraftsalg og krafttransformator er det beregnet en gjennomsnittspris for NO3 i tidsrommet 2018-2022. I de siste årene har kraftprisen variert veldig mye. Ved å benytte en konstant spotpris gjennom hele året vil verdikalkyler ikke være reelle, men kun en indikasjon.

For denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i produksjons- og værforhold fra 2022. Ettersom forholdene vil variere fra år til år, vil det være usikkerhet knyttet til å bruke resultatene fra kun et år med tanke på prosjektering av reelle anlegg.

Værdata brukes for sammenligning i grafer for produksjon av vindkraft, solkraft og elvekraft. Solkraftproduksjon blir sammenlignet med antall soltimer i året, men det er ingen værstasjon for soldata i Selbu. Nærmeste værstasjon blir NTNU Gløshaugen i Trondheim, som skaper usikkerhet knyttet til sammenligning ved analyse av solkraft.

## 8.2 Validitet og pålitelighet

Dataene som er blitt samlet inn for denne oppgaven er relevant for problemstillingen. For vind og elv er dataene reelle og gitt fra to eksisterende kraftverk. For sol er det simulerte data, basert på reelle solinnstrålingsdata fra Stokkfjellet.

Det er tatt utgangspunkt i reelle og simulerte data som er skalert for undersøkelse av produksjonsalternativer. Dataene er godt egnet til problemstillingen for oppgaven. En faktor som svekker påliteligheten vil være at all data er fra 2022. Ingen år er like med tanke på værforhold, som igjen påvirker produksjon for uregulerbare kraftverk. For å ha mer pålitelige data bør det undersøkes data for flere år. Resultatene fra generell analyse er basert på data fra Selbu i Trøndelag, og er ikke nødvendigvis overførbare til resten av landet eller Norden. Forskjeller i vær og inntekt fra kraftsalg vil være varierende.

## 8.3 Etikk

Etiske vurderinger er tema som kommer opp også rundt uregulerbar kraftproduksjon, spesielt når det gjelder miljømessige og samfunnsmessige konsekvenser.

På den ene siden kan uregulerbar kraftproduksjon, som vind-, sol- og elvekraft, være en bærekraftig måte å produsere elektrisitet på, med lave karbonutslipp og minimal miljøpåvirkning. Dette kan være i tråd med etiske prinsipper om å ta vare på miljøet og redusere klimaendringer.

På den annen side kan uregulerbar kraftproduksjon ha negative miljø- og samfunnsmessige konsekvenser, spesielt når det gjelder utbygging av vindkraftanlegg og solcelleparker. Dette kan inkludere ødeleggelse av dyre- og planteliv, forstyrrelse av lokale økosystemer, og tap av livsgrunnlag for lokalsamfunn som er avhengige av naturressurser. I tillegg kan utbygging av utmark føre til konflikter med lokale befolkninger og urbefolkninger som har tradisjonell tilknytning til områdene der kraftverkene bygges.

Ved utbygging av kraftverk bør det være flere miljømessige og samfunnsmessige fordeler enn ulemper. All kraftproduksjon bør utnyttes maksimalt, og struping av produksjon bør unngås for at inngrepet i naturen skal være hensiktsmessig.

Samtidig bør det gjøres etiske vurderinger når det kommer til distribusjon og forvaltning av uregulerbar kraft. Dette kan inkludere spørsmål om rettferdig fordeling av energi og ressurser.

## 9 Konklusjon

I den generelle analysen ble syv alternativer med ulik sammensetning av vind, sol og elvekraft analysert, der alle alternativer til sammen har 150 MW installert effekt. Det ble funnet at vindkraft har høyere årlig produksjon og kapasitetsfaktoren sammenlignet med solkraft og elvekraft. Dermed var alternativet med den høyeste andelen vind, PA 5, det alternativet ga høyest og jevnest produksjonsprofil (Figur 37). Det ble valgt å forbedre PA 5 ved videre analyse.

Resultatene fra forbedring av PA 5 ble at årlig produksjon og kapasitetsfaktor kunne forhöyes ytterligere ved å installere noe høyere effekt av elvekraft enn solkraft, i tillegg til den høye andelen av vind. Ut i fra grafen på Figur 46 kunne det konkluderes med at alternativ PA 5C vil ha den høyeste årsproduksjonen og kapasitetsfaktoren.

Fra analysen av kostnad for transformator vurdert mot inntekt fra kraftsalg, ble det funnet at det vil utgjøre lite for netto-overskudd totalt sett å velge en krafttransformator av mindre størrelse, kontra en lik installert effekt, så lenge det ikke fører til tap av produksjon. Det var liten forskjell i investeringskostnad på de forskjellige transformatorytelsene, og en transformator med lavere ytelse vil til tider kunne oppleve høyere drifts- og belastningsforhold som kan forringe levetiden.

For case-studie Stokkfjellet ble det funnet at krafttransformatoren som er installert på Stokkfjellet har kapasitet til å motta effekt fra et tenkt solkraftverk.

Opptil 30 MW installert solkraft ga minimalt strupningstap på 0,01%, og en økning i nyttiggjort produksjon på 25,9 GWh i året. Ved 120 MW begynte økningen i nyttiggjort produksjon å flate ut, og strupningstap økte til 2,35%. Nyttiggjort produksjon økte med 94,1 GWh i året.

Det vil ikke være nødvendig å søke om ny konsesjon på Stokkfjellet om total produksjon fra vind- og solkraftverket holdes innenfor installert transformator kapasitet på 100 MVA. Men det må saksbehandles av Selbu kommune, og en frivillig melding for anlegget bør sendes til NVE. Ved produksjonsalternativene med høy effekt av solkraft og strupningstap, vil transformator bli hardere belastet. Det vil kunne redusere transformatorens levetid.

For denne oppgaven vil det være usikkerhet knyttet til databehandlingen med skalering av installert effekt, og at datagrunnlaget er fra kun år 2022.

Produksjonsdata som ble mottatt vil ikke være en fasit for hvert år, men vil kunne gi en pekepinn på hvordan samspillet er mellom kraftverkene.

## 10 Videre arbeid

I dette kapitlet presenteres ideer for videre arbeid.

For å kunne støtte analysen av data på en bedre måte hadde vært fordelaktig å hatt tilgang til produksjon- og værdata for flere år. Dette ville gjort vurderingene og valgene mer pålitelige.

Det kunne blitt vurdert muligheter for energilagring i forbindelse med uregulerbar kraft.

Videre utdypning av denne oppgaven kunne vært å utført en lastflytanalyse for område i Selbu. Da kunne produksjonen fra kraftverkene vært vurdert mot forbruk og kanskje knyttet opp mot spesifikke industrilaster.

For videre arbeid og mer utdypning av det tekniske i oppgaven ville det vært relevant å gå mer i dybden på transformatorberegninger. Belastning av transformator kan påvirke levetiden, som kunne ha blitt undersøkt mer nøye dersom det var tid.

### 10.1 Generell analyse

For den generelle analysen kunne det vært utført en fullstendig kost-nytteanalyse for flere produksjonsalternativ. Å undersøke flere størrelser på installert effekt for å analysere produksjonsmønster til kraftverkene kunne vært en mulighet.

### 10.2 Case-studie Stokkfjellet

Videre arbeid kunne vært å simulere solparker som utnytter konsesjonsområde mest optimalt, for å undersøke hvor mye solkraft som er mulig å installere innenfor konsesjonsområde til Stokkfjellet vindpark.

Det kunne vært utført en fullstendig kost-nytteanalyse for solkraftverket på Stokkfjellet.

## 11 Referanser

- [1] *Et fossilfritt energisystem trenger mer effekt | Statnett*. URL: <https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/et-fossilfritt-energisystem-trenger-mer-effekt?publisherId=89853&releaseId=17933850> (sjekket 19.05.2023).
- [2] NOU - Norges offentlige utredninger. *Mer av alt - raskere*. Rapport. Publisher: NOU.
- [3] Pressemelding 24.01.2023. *Aneo med milliardinvestering i Sverige*. URL: <https://www.aneo.com/om-oss/nyheter/aneo-med-milliardinvestering-i-sverige/> (sjekket 19.05.2023).
- [4] *Ny kraft*. URL: <https://www.aneo.com/fornybar-kraft/ny-kraftutbygging/> (sjekket 10.05.2023).
- [5] *Kraftproduksjon*. Energifakta Norge. URL: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/> (sjekket 10.05.2023).
- [6] Knut Hofstad. *vindkraftverk*. I: *Store norske leksikon*. 25. jan. 2023. URL: <https://snl.no/vindkraftverk> (sjekket 10.05.2023).
- [7] Knut A. Rosvold. *elvekraftverk*. I: *Store norske leksikon*. 25. jan. 2023. URL: <https://snl.no/elvekraftverk> (sjekket 10.05.2023).
- [8] Knut A. Rosvold og Jo Halvard Halleraker. *pumpekraftverk*. I: *Store norske leksikon*. 25. jan. 2023. URL: <https://snl.no/pumpekraftverk> (sjekket 10.05.2023).
- [9] *Om kraftmarkedet og det norske kraftsystemet - NVE*. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/kunde/om-kraftmarkedet-og-det-norske-kraftsystemet/> (sjekket 18.05.2023).
- [10] *Grunnleggende om vindenergi: Kjente du vilkårene?* TESUP NO. 2. mar. 2023. URL: <https://www.tesup-norge.com/post/grunnleggende-om-vindenergi-kjente-du-vilk%C3%A5rene> (sjekket 19.05.2023).
- [11] *Våre produkter :: Suntrack Nordic AS*. 6. okt. 2021. URL: <https://www.suntracknordic.com/vare-produkter/> (sjekket 18.05.2023).
- [12] *Kraftproduksjon fra vindturbiner - NVE*. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/kraftproduksjon-fra-vindturbiner/> (sjekket 14.05.2023).
- [13] *Data for utbygde vindkraftverk i Norge - NVE*. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/data-for-utbygde-vindkraftverk-i-norge/> (sjekket 15.05.2023).
- [14] *Konsesjonssaker - NVE*. URL: <https://www.nve.no/konsesjon/konsesjonssaker/> (sjekket 14.05.2023).
- [15] *Data for utbygde vindkraftverk i Norge - NVE*. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/data-for-utbygde-vindkraftverk-i-norge/> (sjekket 14.05.2023).

- [16] Knut A. Rosvold og Knut Hofstad. *Betz' lov. I: Store norske leksikon*. 25. jan. 2023. URL: [https://snl.no/Betz'\\_lov](https://snl.no/Betz'_lov) (sjekket 10.05.2023).
- [17] *Fysikk: energi og effekt i vinden | UngEnergi*. URL: <https://ungenergi.no/energikilder/vindkraft/fysikk-energi-og-effekt-i-vinden/> (sjekket 10.05.2023).
- [18] *Vannkraft slår knockout på vindmøllene i oppetid, stabilitet og kraftproduksjon*. Tu.no. 21. mar. 2023. URL: <https://www.tu.no/artikler/vannkraft-slar-knockout-pa-vindmollene-i-oppetid-stabilitet-og-kraftproduksjon/528166> (sjekket 19.05.2023).
- [19] Jan Emblemsvåg. *Vindkraft og kostnader i Norge*. Energi & Natur. 6. jun. 2021. URL: <https://energiognatur.no/vindkraft-og-kostnader-i-norge/> (sjekket 19.05.2023).
- [20] *Solkraft | Statkraft*. URL: <https://www.statkraft.com/var-virksomhet/solkraft/> (sjekket 19.05.2023).
- [21] *Solceller, Strøm | Fakta: Slik virker solceller*. URL: <https://www.minenergi.no/fakta-slik-virker-solceller/s/5-147-104> (sjekket 10.05.2023).
- [22] *Hva er en inverter? - Solcellepanel | Lyse*. URL: <https://www.lyse.no/kundeservice/artikler/360016992177-hva-er-en-inverter-> (sjekket 19.05.2023).
- [23] *PV-koblingsboksens bypassdiode for solcellebeskyttelse - Kunnskap - DS New Energy*. DS Ny Energi. URL: <http://no.dsisolar.com/info/pv-junction-box-s-bypass-diode-for-solar-panel-54221813.html> (sjekket 10.05.2023).
- [24] *Enova må støtte energilagring*. Tu.no. 15. sep. 2022. URL: <https://www.tu.no/artikler/enova-ma-stotte-energilagring/522176> (sjekket 19.05.2023).
- [25] *Solkraft - NVE*. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/solkraft/> (sjekket 10.05.2023).
- [26] Statnett. *Kortsiktig markedsanalyse 2021-26*. Rapport. Publisher: statnett.no. URL: <https://www.statnett.no/contentassets/0c94b075b98d45a89d2d0960f4328c55/kortsiktig-markedsanalyse-2021-2026.pdf>.
- [27] *Nå får Norge sitt første store solkraftverk*. 5. mai 2022. URL: <https://e24.no/i/Rr7Kj0> (sjekket 10.05.2023).
- [28] *Kjøper seg opp i svensk solkraft*. Europower | Siste nyheter fra fornybarbransjen. Section: solenergi. 2. feb. 2021. URL: <https://www.europower.no/solenergi/kjoper-seg-opp-i-svensk-solkraft/2-1-955722> (sjekket 10.05.2023).
- [29] *Kraftproduksjon*. Energifakta Norge. URL: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/> (sjekket 10.05.2023).
- [30] Knut A. Rosvold og Jo Halvard Halleraker. *tilsig. I: Store norske leksikon*. 25. jan. 2023. URL: <https://snl.no/tilsig> (sjekket 10.05.2023).



- [31] *Ulike typer vannkraftverk - Energi- og styresystemer (EL-ELE vg1) - NDLA*. ndla.no. URL: <https://ndla.no/nb/subject:1:8c5a9fdd-4fa4-456b-9afe-34e7e776b4e7/topic:5a2a8f85-cbf6-4f24-8311-404f30c38c02/topic:7f336cde-64aa-4e1a-b418-374215d0f397/resource:72e86cf4-180b-4269-b5b1-b56b25528695> (sjekket 10.05.2023).
- [32] *Slik virker en vannkraftturbine*. Tu.no. 20. sep. 2020. URL: <https://www.tu.no/artikler/her-er-de-tre-turbintypene-du-finner-i-vannkraftverk-i-dag/499547> (sjekket 10.05.2023).
- [33] *Pelton turbin*. Spetals verk. URL: <https://spetalsverk.no/vannkraft/peltonturbine> (sjekket 10.05.2023).
- [34] Jacob Lamb. *Vannkraft*. Rapport. Publisher: NTNU.
- [35] *Hvordan virker en generator? | UngEnergi*. URL: <https://ungenergi.no/energibaerere/elektrisitet/generator/> (sjekket 10.05.2023).
- [36] Morten Kraabøl. "Varegrinder foran turbininntak ved elvekraftverk; barrierer eller inngangsport for fisk?" I: (2013).
- [37] Multiconsult NVE ved Jenny Evjen og Randi Holme. *Statusrapport om coanda-inntak*. Rapport. Publisher: NVE.no. 2020.
- [38] *Dette er erfaringene med Coanda-inntak*. Europower | Siste nyheter fra fornybarbransjen. Section: vannkraft. 15. mai 2020. URL: <https://www.europower.no/vannkraft/dette-er-erfaringene-med-coanda-inntak/2-1-809491> (sjekket 19.05.2023).
- [39] Knut Hofstad. *kapasitetsfaktor*. I: *Store norske leksikon*. 5. aug. 2022. URL: <https://snl.no/kapasitetsfaktor> (sjekket 10.05.2023).
- [40] *Transformator*. I: *Wikipedia*. Page Version ID: 23435731. 24. mar. 2023. URL: <https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Transformator&oldid=23435731> (sjekket 10.05.2023).
- [41] Jørn Foros. *Når bør jeg skifte ut en gammel transformator?* #SINTEFblogg. 21. sep. 2021. URL: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/nar-bor-jeg-skifte-transformator/> (sjekket 12.05.2023).
- [42] *Faseforskjyning i vekselspenningskretser - Energi- og styresystemer (EL-ELE vg1) - NDLA*. ndla.no. URL: <https://ndla.no/nb/subject:1:8c5a9fdd-4fa4-456b-9afe-34e7e776b4e7/topic:44101cfc-387d-4aff-b2f0-2510a0c0de9c/resource:c8189bc2-38a8-4401-a63c-5d1996897afc> (sjekket 21.05.2023).
- [43] Kjell Saugstad. *transformator*. I: *Store norske leksikon*. 25. jan. 2023. URL: <https://snl.no/transformator> (sjekket 21.05.2023).
- [44] *reaktiv effekt*. I: *Store norske leksikon*. 24. jan. 2023. URL: [https://snl.no/reaktiv\\_effekt](https://snl.no/reaktiv_effekt) (sjekket 21.05.2023).
- [45] Øyvind Grøn. *reaktiv strøm*. I: *Store norske leksikon*. 24. jan. 2023. URL: [https://snl.no/reaktiv\\_str%C3%B8m](https://snl.no/reaktiv_str%C3%B8m) (sjekket 21.05.2023).
- [46] Frode Høyte. *kondensatorbatteri*. I: *Store norske leksikon*. 23. jan. 2023. URL: <https://snl.no/kondensatorbatteri> (sjekket 21.05.2023).

- [47] *Reaktiv effekt*. Norgesnett. 8. feb. 2023. URL: <https://norgesnett.no/sporsmal-og-svar/reaktiv-effekt/> (sjekket 21.05.2023).
- [48] *Transformatorene er strømnnettets skjulte kraftkarer*. Tu.no. 22. feb. 2020. URL: <https://www.tu.no/artikler/transformatorene-er-stromnettets-skjulte-kraftkarer/485808> (sjekket 12.05.2023).
- [49] K. Sand og A.O. Eggen. *Tapskostnader*. Rapport. Publisher: Planleggingsbok for kraftnett, REN.no. 2014.
- [50] Alexandre Piatniczka mfl. “Transformer Loss of Life Monitoring: A review of in-service highlighting achieved benefits”. I: *2022 75th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. 2022 75th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). College Station, TX, USA: IEEE, 28. mar. 2022, s. 1–7. ISBN: 978-1-66546-903-6. DOI: 10.1109/CPRE55809.2022.9776562. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9776562/> (sjekket 10.05.2023).
- [51] Kårstein Longva. *Fordelingstransformatorer og levetid*. Rapport. Publisher: Møre Trafo AS. 1999. URL: <https://moretrafo.no/download/?id=1659>.
- [52] *What is Switchgear? All you need to know about it*. URL: <https://blog.se.com/energy-management-energy-efficiency/electrical-safety/2021/03/01/all-you-need-to-know-about-switchgear-what-is-it-how-does-it-work-and-types/> (sjekket 19.05.2023).
- [53] C.H. Skotland mfl. *Gassisolerte og luftisolerte bryteranlegg En sammenligning av kostnader, miljøpåvirkning og forsyningssikkerhet*. NVE-rapport 55/2017. URL: [https://publikasjoner.nve.no/rapport/2017/rapport2017\\_55.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rapport/2017/rapport2017_55.pdf).
- [54] *Styringsrenten*. URL: <https://www.norges-bank.no/tema/pengepolitikk/Styringsrenten/> (sjekket 10.05.2023).
- [55] *Renten settes opp: Nå går boliglånsrentene over 5 prosent – og det kommer mer!* Huseierne. 23. mar. 2023. URL: <https://www.huseierne.no/nyheter/beste-boliglansrente-i-mars-2023---renten-settes-opp/> (sjekket 19.05.2023).
- [56] *Bedriftslån - Sammenlign firmalån her - Nettavisen*. Forbrukslån, smålån og refinansiering av gjeld. URL: <https://www.nettavisen.no/snap0.api.no/forbruksl%C3%A5n/bedriftslan/> (sjekket 10.05.2023).
- [57] *PVsystem – Logiciel Photovoltaïque*. URL: <https://www.pvsyst.com/> (sjekket 10.05.2023).
- [58] *Welcome to Python.org*. Python.org. 5. mai 2023. URL: <https://www.python.org/> (sjekket 10.05.2023).
- [59] *Project Jupyter*. URL: <https://jupyter.org> (sjekket 10.05.2023).
- [60] *Historiske strømpriser fra NordPool*. elKompis. URL: <https://www.elkompis.no/historiske-strompriser> (sjekket 10.05.2023).
- [61] *Statistikk*. Elhub. URL: <https://elhub.no/statistikk/> (sjekket 10.05.2023).
- [62] *Observasjoner og værstatistikk - Seklima*. URL: <https://seklima.met.no/> (sjekket 10.05.2023).
- [63] Beate Nesje. *Bachelor vind, sol og elv*. Apr. 2023.

- [64] Jens Petter Hanssen. *Mulighet for hjelp til bacheloroppgave*. Apr. 2023.
- [65] *Valutakurser*. URL: <https://www.norges-bank.no/tema/Statistikk/Valutakurser/> (sjekket 10.05.2023).
- [66] *Stokkfjellet vindpark*. URL: <https://www.aneo.com/fornybar-kraft/var-kraftproduksjon/stokkfjellet-vindpark/> (sjekket 10.05.2023).
- [67] *V136-4.2 MW<sup>TM</sup>*. 10. mai 2023. URL: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-4-2-MW> (sjekket 10.05.2023).
- [68] *Konsesjonssak - NVE*. URL: <https://www.nve.no/konsesjon/konsesjonssaker/konsesjonssak/?id=4001&type=A-1> (sjekket 16.05.2023).
- [69] *Historiske værdata for Selbu som graf - 2022*. Yr. URL: <https://www.yr.no/nn/historikk/graf/5-68290/Noreg/Tr%C3%B8ndelag/Selbu/Selbu?q=2022> (sjekket 10.05.2023).
- [70] *Konsesjonsbehandling av solkraftverk - NVE*. URL: <https://www.nve.no/konsesjon/konsesjonsbehandling-av-solkraftverk/> (sjekket 10.05.2023).
- [71] Jan Ove Uthus. *Mølnåa kraftverk - bidrag til bacheloroppgave*. Feb. 2023.
- [72] Jan Ove Uthus. *Data-analysering fra Mølnåa 2022 Bacheloroppgave*. Mar. 2023.
- [73] *Mølnåa Kraftverk*. Selbu Energiverk. URL: <https://www.selbu-energiverk.no/molnaa-kraftverk/> (sjekket 10.05.2023).
- [74] Jan Ove Uthus. *Minstevannsføring i elva Mølnåa*. Mai 2023.
- [75] *NVE Atlas*. URL: <https://atlas.nve.no/Html5Viewer/index.html?viewer=nveatlas#> (sjekket 10.05.2023).
- [76] *Kraftsystemutredning for Sør-Trøndelag 2022-2042*. URL: <https://braa.icdn.no/media/dokumenter/rksu2022-sor-trondelag-hovedrapport.pdf> (sjekket 10.05.2023).

## 12 Vedlegg

### 12.1 Produksjonsalternativer fra case-studie Stokkfjellet

Tabell 15: PA og resultat fra case-studie Stokkfjellet

PA	Vind (MW)	Sol (MW)	Total (MW)	Traføytelse (MVA)	Nyttiggjort produksjon (GWh/år)	Strupningstap (%)	Tapt produksjon (MWh)
1	88.2	1	89.2	100	298.6	0.00	0.0
2	88.2	10	98.2	100	306.3	0.00	0.0
3	88.2	20	108.2	100	315.0	0.00	0.0
4	88.2	30	118.2	100	323.6	0.01	20.1
5	88.2	40	128.2	100	332.1	0.05	152.1
6	88.2	50	138.2	100	340.4	0.14	487.2
7	88.2	60	148.2	100	348.4	0.32	1105.7
8	88.2	70	158.2	100	356.2	0.54	1923.2
9	88.2	80	168.2	100	363.7	0.82	3000.6
10	88.2	90	178.2	100	371.0	1.15	4315.3
11	88.2	100	188.2	100	378.1	1.52	5820.0
12	88.2	110	198.2	100	385.1	1.91	7483.5
13	88.2	120	208.2	100	391.8	2.35	9408.9
14	88.2	130	218.2	100	398.2	2.83	11615.7
15	88.2	140	228.2	100	404.1	3.43	14354.3
16	88.2	150	238.2	100	409.3	4.17	17825.0
17	88.2	160	248.2	100	414.0	4.98	21719.5
18	88.2	170	258.2	100	418.4	5.84	25950.7
19	88.2	180	268.2	100	422.5	6.72	30427.5
20	88.2	190	278.2	100	426.5	7.61	35128.4
21	88.2	200	288.2	100	430.2	8.51	40031.5

## 12.2 Kodesnutt databehandling

Kode som kalkulerer nøkkelverdier for produksjonsalternativer

```
import pandas as pd
import numpy as np
from itertools import product
from openpyxl.utils.dataframe import dataframe_to_rows

# Les inn data fra Excel-filen
file_path = "C:/Users/filnavn.xlsx"
data = pd.read_excel(file_path)

# Definer skaleringsstall for Vind, Sol, og Elv
vind_scalings = [88.2]
sol_scalings = [
    1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90,
    100, 110, 120, 130, 140, 150,
    160, 170, 180, 190, 200]
elv_scalings = [0]

# Funksjon for generere scenarioer automatisk
def generate_scenarios(vind_scalings, sol_scalings, elv_scalings):
    scenarios = []
    for i, (vind, sol, elv) in enumerate(product(vind_scalings,
                                                sol_scalings, elv_scalings),
                                        start=1):
        scenarios.append({
            "Produksjonsmodell_nr": i,
            "Vind": vind,
            "Sol": sol,
            "Elv": elv,
            "Total": vind+sol+elv})
    return scenarios

# Generer scenarioer
scenarios = generate_scenarios(vind_scalings, sol_scalings, elv_scalings
                               )

# Definer production_limit-verdier
production_limit_values = [100] # Legg til flere production_limit-
                               verdier etter nske
#production_limit_values = list(range(10, 131, 1))

# Grenseverdier for prosentandel over_production_limit
thresholds = [0.0, 0.025, 0.05]

total_scenarios = len(scenarios) * len(production_limit_values)
evaluated_scenarios = 0

# Funksjon for evaluere hvert scenario og production_limit-verdi
def evaluate_scenario(data, scenario, production_limit):
    scaled_data = data.copy()
    scaled_data["Vind (1 MW) MWh"] *= scenario["Vind"]
```

```
scaled_data["Sol (1 MW) MWh"] *= scenario["Sol"]
scaled_data["Elv (1 MW) MWh"] *= scenario["Elv"]

# Beregn summen av vind, sol og elv for hvert tidspunkt
scaled_data["Total"] = scaled_data["Vind (1 MW) MWh"] + scaled_data["Sol (1 MW) MWh"] + scaled_data["Elv (1 MW) MWh"]

# Beregn over_production_limit og within_production_limit for hver dag
scaled_data['over_production_limit_daily'] = np.maximum(scaled_data['Total'] - production_limit, 0)
scaled_data['within_production_limit_daily'] = np.minimum(scaled_data['Total'], production_limit)

# Beregn rstotaler
over_production_limit_total = scaled_data["over_production_limit_daily"].sum()
within_production_limit_total = scaled_data["within_production_limit_daily"].sum()
max_potential_production = scaled_data["Total"].sum()
production_vind = scaled_data["Vind (1 MW) MWh"].sum()
production_sol = scaled_data["Sol (1 MW) MWh"].sum()
production_elv = scaled_data["Elv (1 MW) MWh"].sum()
over_production_limit_percentage = over_production_limit_total / max_potential_production

# Returner resultatet av evalueringen som en dictionary
return {
    "over_production_limit": over_production_limit_total,
    "within_production_limit": within_production_limit_total,
    "max_potential_production": max_potential_production,
    "over_production_limit_percentage": over_production_limit_percentage,

    "production_vind": production_vind,
    "production_sol": production_sol,
    "production_elv": production_elv,}

# Dataframe for lagre resultatene
results = pd.DataFrame(columns=[
    "Produksjonsmodell",
    "Vind (MWh)",
    "Sol (MWh)",
    "Elv (MWh)",
    "Total (MWh)",
    "production_limit kapasitet (MVA)",
    "Tapt produksjonspotensial (%)",
    "Tapt produksjonspotensial (MWh)",
    "Utnyttet produksjonspotensial (MWh)",
    "Totalt produksjonspotensial (MWh)",
    "Produksjonsbidrag vind (MWh)",
```

```
"Produksjonsbidrag sol (MWh)",
"Produksjonsbidrag elv (MWh)"] +
[f"Grense_{int(t*100)}%" for t in thresholds])

# Iterer gjennom scenarioer, production_limit-verdier og evaluer dem
for scenario in scenarios:
    for production_limit in production_limit_values:
        result = evaluate_scenario(data, scenario, production_limit)

        # Sjekk prosentandelen over_production_limit mot grenseverdiene
        threshold_flags = {}
        for threshold in thresholds:
            flag_name = f"Grense_{int(threshold * 100)}%"
            threshold_flags[flag_name] = result[
                "over_production_limit_percentage"] > threshold

        # Legg til resultatet i resultat-dataframen
        results = results.append({
            "Produksjonsmodell": scenario["Produksjonsmodell_nr"],
            "Vind (MWh)": scenario["Vind"],
            "Sol (MWh)": scenario["Sol"],
            "Elv (MWh)": scenario["Elv"],
            "Total (MWh)": scenario["Vind"]+scenario["Sol"]+scenario["Elv"],
            "production_limit kapasitet (MVA)": production_limit,
            "Tapt produksjonspotensial (%)": result
                ["over_production_limit_percentage"] * 100,
            "Tapt produksjonspotensial (MWh)": result["over_production_limit
                "],
            "Utnyttet produksjonspotensial (MWh)": result["
                within_production_limit"],
            "Totalt produksjonspotensial (MWh)": result["
                max_potential_production"],
            "Produksjonsbidrag vind (MWh)": result["production_vind"],
            "Produksjonsbidrag sol (MWh)": result["production_sol"],
            "Produksjonsbidrag elv (MWh)": result["production_elv"],
            **threshold_flags,
        },
        ignore_index=True,)

        # Oppdater fremdriftsvisningen
        evaluated_scenarios += 1
        print(f"Evaluert: {evaluated_scenarios}/{total_scenarios}", end=
            "\r")

# Lagre resultatene i et nytt Excel-dokument
output_file_path = "resultater.xlsx"
results.to_excel(output_file_path, index=False)

print("\nProsess fullfort!")
```

## 12.3 Kodesnutt plotting

Kode som genererer interaktive plott i jupyter notebook

```
import pandas as pd
import numpy as np
import plotly.graph_objects as go
import locale

from ipywidgets import widgets, HBox, VBox

# Ordne riktig tusenseparator
locale.setlocale(locale.LC_ALL, 'nb_NO.UTF-8')

#Endre denne filplasseringen til filens lokasjon p din egen PC. Kan
# hende du m endre fra \ til / i
# fillokasjonen.
file_path = "C:/Users/filnavn.xlsx"
# Les inn arket og angi at f rste rad skal brukes som kolonnenavn
data = pd.read_excel(file_path, sheet_name='Ark1', engine='openpyxl',
                    header=0)

def update_plot(vind_scale, sol_scale, elv_scale, constant_value):
    scaled_data = data.copy()
    scaled_data['Vind_scaled'] = scaled_data['Vind (1 MW) MWh'] *
                                vind_scale
    scaled_data['Sol_scaled'] = scaled_data['Sol (1 MW) MWh'] *
                                sol_scale
    scaled_data['Elv_scaled'] = scaled_data['Elv (1 MW) MWh'] *
                                elv_scale
    scaled_data['Sum_scaled'] = (scaled_data['Vind_scaled'] +
                                scaled_data['Sol_scaled'] +
                                scaled_data['Elv_scaled'])

    with fig.batch_update():
        fig.data[0].y = scaled_data['Vind_scaled']
        fig.data[1].y = scaled_data['Sol_scaled']
        fig.data[2].y = scaled_data['Elv_scaled']
        fig.data[3].y = scaled_data['Sum_scaled']
        fig.data[4].y = [constant_value] * len(scaled_data)

    return fig, scaled_data

def energy_unit_formatter(value):
    if abs(value) < 1e3:
        return f"{value:.2f} kWh"
    elif abs(value) < 1e6:
        return f"{value / 1e3:.2f} MWh"
    else:
        return f"{value / 1e6:.2f} GWh"

def currency_unit_formatter(value):
    value_str = locale.format_string("%d", value, grouping=True)
    return f"{value_str} NOK"
```



```

#Beregner hvor mange ganger produksjonsverdien g r over
#transformatorytelsen.
def calculate_crossings(scaled_data, constant_value):
    sum_scaled = scaled_data['Sum_scaled'].values
    diff = sum_scaled - constant_value
    crossings = np.where(np.diff(np.sign(diff)) > 0)[0]
    return len(crossings)

#Summerer produksjonsverdi over og under trafoytelse
def calculate_over_under(scaled_data, constant_value):
    sum_scaled = scaled_data['Sum_scaled'].values
    over = np.sum(np.maximum(sum_scaled - constant_value, 0))
    under = np.sum(np.minimum(sum_scaled, constant_value))
    total_sum_scaled = np.sum(sum_scaled)
    return over, under, total_sum_scaled

#Økonomiske beregninger
def calculate_income_and_loss(scaled_data, constant_value, euro_per_mwh)
    :
    over, under, total_sum_scaled = calculate_over_under(scaled_data,
    constant_value)

    lost_income = over * euro_per_mwh
    income = under * euro_per_mwh
    income_potensial = total_sum_scaled * euro_per_mwh
    return lost_income, income, income_potensial

#Produksjon ut over transformatorytelese i prosent
def calculate_percentage_loss(over, sum_scaled):
    total_sum_scaled = np.sum(sum_scaled)
    if total_sum_scaled < 1e-9:
        return 0
    percentage_loss = (over / total_sum_scaled) * 100
    return percentage_loss

def calculate_smoothness(scaled_data):
    sum_scaled = scaled_data['Sum_scaled']
    differences = sum_scaled.diff().dropna()
    return differences.std()

def evaluate_scenarios(scenarios, euro_per_mwh=291.37, constant_values=
    None):
    if constant_values is None:
        constant_values = list(range(40, 131))

    results = []
    for scenario in scenarios:
        wind_scale = scenario['wind_scale']
        solar_scale = scenario['solar_scale']
        hydro_scale = scenario['hydro_scale']

        for constant_value in constant_values:
            _, scaled_data = update_plot(
                wind_scale,
                solar_scale,
                hydro_scale,

```

```

        constant_value)
    smoothness = calculate_smoothness(
        scaled_data)

    over, under, total_sum_scaled = calculate_over_under(
        scaled_data,
        constant_value)
    crossings = calculate_crossings(
        scaled_data,
        constant_value)
    lost_income, income, income_potensial =
        calculate_income_and_loss(
            scaled_data,
            constant_value,
            euro_per_mwh)
    percentage_loss = calculate_percentage_loss(
        over,
        total_sum_scaled)

    result = {
        'Vind (MWh)': wind_scale,
        'Sol (MWh)': solar_scale,
        'Elv (MWh)': hydro_scale,
        'Trafokapasitet (MVA)': constant_value,
        'Totalt inntektspotensial (NOK)': income_potensial,
        'Inntekt (NOK)': income,
        'Tapt inntekt (NOK)': lost_income,
        'Totalt produksjonspotensial (MWh)': total_sum_scaled,
        'Utnyttet produksjonspotensial (MWh)': under,
        'Tapt produksjonspotensial (MWh)': over,
        'Tapt produksjonspotensial (%)': percentage_loss,
        'Enkelthendelser over trafokapasitet': crossings,
        'Glatthet': smoothness,
        'Energipris (NOK)': euro_per_mwh
    }
    results.append(result)

    return results

#Kaller funksjoner og kalkulerer nøkkelverdier
def on_button_click(button):
    vind_scale = float(vind_scale_input.value)
    sol_scale = float(sol_scale_input.value)
    elv_scale = float(elv_scale_input.value)
    constant_value = float(constant_input.value)
    euro_per_mwh = float(euro_per_mwh_input.value)
    fig, scaled_data = update_plot(vind_scale, sol_scale, elv_scale,
        constant_value)

    over, under, total_sum_scaled = calculate_over_under(
        scaled_data,
        constant_value)
    crossings = calculate_crossings(
        scaled_data,

```

```

    constant_value)
lost_income, income, income_potensial = calculate_income_and_loss(
    scaled_data,
    constant_value,
    euro_per_mwh)
percentage_loss = calculate_percentage_loss(
    over,
    scaled_data['Sum_scaled'].sum())
over_label.value = f"Tappt produksjonspotensial: {
    energy_unit_formatter(over)}"
under_label.value = f"Utnyttet produksjonspotensial: {
    energy_unit_formatter(under)}"
total_sum_scaled_label.value = f"Totalt produksjonspotensial: {
    energy_unit_formatter(
    total_sum_scaled)}"
crossings_label.value = f"Antall enkelthendelser over trafokapasitet
    : {crossings} stk"
lost_income_label.value = f"Tappt inntekt: {currency_unit_formatter(
    lost_income)}"
income_label.value = f"Inntekt: {currency_unit_formatter(income)}"
income_potensial_label.value = f"Totalt inntektspotensial: {
    currency_unit_formatter(
    income_potensial)}"
percentage_loss_label.value = f"Tap fra struping av anlegget: {
    percentage_loss:.2f}%"

#Plotting i interaktiv graf
fig = go.FigureWidget()

fig.add_trace(go.Scatter(
    x=data['Dato - Timeserie'],
    y=data['Vind (1 MW) MWh'],
    name='Vind'))
fig.add_trace(go.Scatter(
    x=data['Dato - Timeserie'],
    y=data['Sol (1 MW) MWh'],
    name='Sol'))
fig.add_trace(go.Scatter(
    x=data['Dato - Timeserie'],
    y=data['Elv (1 MW) MWh'],
    name='Elv'))
fig.add_trace(go.Scatter(
    x=data['Dato - Timeserie'],
    y=data['Vind (1 MW) MWh'],
    name='Sum'))
fig.add_trace(go.Scatter(
    x=data['Dato - Timeserie'],
    y=[50] * len(data),
    name='Konstant'))

fig.update_layout(
    title='Skalert energiproduksjon',
    xaxis_title='Tid',
    yaxis_title='Produksjon (MW)')

```

```
fig.update_xaxes(
    rangelslider_visible=True)
fig.update_yaxes(
    range=[0, 150])

vind_scale_input = widgets.FloatText(
    value=1.0,
    description='Vind skalering:')
sol_scale_input = widgets.FloatText(
    value=1.0,
    description='Sol skalering:')
elv_scale_input = widgets.FloatText(
    value=1.0,
    description='Elv skalering:')
constant_input = widgets.FloatText(
    value=50.0,
    description='Trafo:')
euro_per_mwh_input = widgets.FloatText(
    value=1.0,
    description='NOK per MWh:')
update_button = widgets.Button(
    description='Oppdater')
update_button.on_click(on_button_click)

over_label = widgets.Label(
    value="")
under_label = widgets.Label(
    value="")
total_sum_scaled_label = widgets.Label(
    value="")
crossings_label = widgets.Label(
    value="")
percentage_loss_label = widgets.Label(
    value="")
lost_income_label = widgets.Label(
    value="")
income_label = widgets.Label(
    value="")
income_potensial_label = widgets.Label(
    value="")

input_widgets_1 = HBox([
    vind_scale_input,
    sol_scale_input,
    elv_scale_input])
input_widgets_2 = HBox([
    constant_input,
    euro_per_mwh_input,
    update_button])
output_labels_1 = VBox([
    income_label,
    under_label,
    crossings_label])
output_labels_2 = VBox([
```

```
    lost_income_label,  
    over_label,  
    percentage_loss_label])  
output_labels_3 = VBox([  
    income_potensial_label,  
    total_sum_scaled_label])  
output_labels_three_columns = HBox([  
    output_labels_1,  
    output_labels_2,  
    output_labels_3])  
  
display(input_widgets_1, input_widgets_2)  
display(fig)  
display(output_labels_three_columns)  
  
# Oppdater plottet en gang for vise initialdataene  
on_button_click(None)
```

# Design av hybridkraftverk – Elvekraft, solkraft og vindkraft i samme elektriske infrastruktur

Christian Bjøntegaard, Tor Martin Flø Gustad, Kristin Iversen, Ole-André Tunheim Strømsheim

## Bakgrunn

Det er stort behov for utvikling av ny fornybar energi og nettinvesteringer i forbindelse med elektrifiseringen av Norge. Oppdragsgiver Aneo ønsker i den forbindelse å undersøke mulighetene for å øke kraftproduksjon med uregulerbar kraft som ikke krever store nettinvesteringer.

## Oppgaven

Oppgaven har som mål å undersøke samspillet mellom produksjon fra vindkraft, solkraft og elvekraft, som et hybridkraftverk, i samme infrastruktur. Det analyseres hvor jevn og høy årlig produksjon fra hybridkraftverket kan bli.

## Metode

Data fra Stokkfjellet vindpark og Mølnåa elvekraftverk i Selbu kommune, blir sammen med simulerte solkraftdata, analysert i Excel og Pythonkode. Data for solkraftverk simuleres med programmet PVsyst.

## Generell analyse

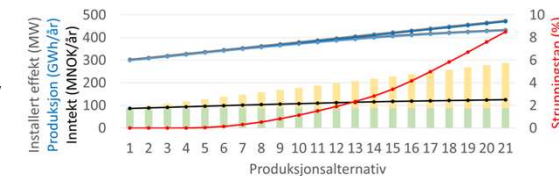
Ved å undersøke samspillet mellom tre kraftverk og en felles krafttransformator, vurderes syv forskjellige produksjonsalternativer. Målet er å komme frem til et alternativ som gir en jevn og høy produksjon, høyest kapasitetsfaktor og en mest mulig forutsigbar kraftforsyning. To transformatorstørrelser er vurdert for hvert alternativ.

Det blir funnet at vindkraft isolert sett har høyest årlig produksjon og kapasitetsfaktor sammenlignet med solkraft og elvekraft. Alternativ PA 5 undersøkes videre. Resultatene av forbedret PA 5 viser at årlig produksjon kan forhøyes ytterligere ved å installere noe høyere effekt av elvekraft enn solkraft, i tillegg til den høye andelen av vind.

Alt.	Vind [%]	Sol [%]	Elv [%]	Prod [GWh]	Kap.f [%]
PA 5.A	71,3	14,3	14,3	435,7	33,2
PA 5.B	71,3	18,7	10	424,6	32,3
PA 5.C	71,3	10	18,7	447,4	34,0

## Casestudie

Det blir undersøkt hvor stor effekt av solkraft som kan installeres sammen med Stokkfjellet vindpark, med utgangspunkt i eksisterende krafttransformator.



Det blir funnet at ved 0- 50 MW installert solkraft vil et produksjonstap ligge under 0,5%, og nyttiggjort produksjon øker med opp til 46,5 GWh i året. Nyttiggjort produksjon flater ut når produksjonstapet øker. Det vil ikke være nødvendig å søke om ny konsesjon på Stokkfjellet om total produksjon fra vind- og solkraftverket holdes innenfor nåværende transformators kapasitet, men det må saksbehandles av kommunen.

