



UiT Norges arktiske universitet

Fakultetet for naturvitenskap og teknologi

Institutt for fysikk og teknologi

## Solenergi i mikronett ved gårdsbruk på Røros

Eiliv Erik Ulrich Løchen

Masteroppgave i energi, klima og miljø EOM-3901 Juni 2023



## Abstrakt

I denne masteroppgaven har jeg undersøkt hvilket solenergisystem som vil være det mest hensiktsmessige for å minimere belastningen på det lokale strømmettet på Røros. Dette ble gjort ved å se på dimensjonering av solenergianlegg og batteripakker i et mikronett.

Dette gjorde jeg ved å bruke solstrålingsdatabaser, og basert på dagens solcelle- og batteriteknologi, beregne hvor mye strøm som kan genereres og lagres. Jeg valgte å undersøke dette basert på min interesse for solenergi og måtene den kan bidra til å møte energibehovet i samfunnet vårt. I tillegg vil et mikronett med batterilagring kunne avlaste strømmettet og dermed sikre strømforsyningen bedre.

Ved å installere solcellepanel på 2500 m<sup>2</sup> på taket fjøset til Galåen Samdrift, vil man i løpet av et år kunne produsere oppimot 270 000 kWh strøm, på et anlegg med 316,8 kWp og 802 solcellepanel. Kostnadene på dette ville blitt rundt 9 millioner kroner, med en nedbetalingstid på under 10 år. Kombineres dette med et batteri på 3,5 MWh, vil man få en selvforsyningsgrad på 65% til en pris av 29 millioner kroner som gir en nedbetalingstid på 29 år.

# Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for og teknologi ved Fakultetet for naturvitenskap og teknologi ved Norges arktiske universitet (UiT) i Tromsø våren 2023. Oppgaven representerer fullførelsen av en sivilingeniørgrad innen energi, klima og miljø.

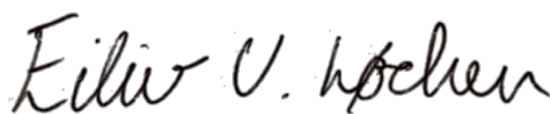
Oppgaven tar for seg hvordan et mikronett med solenergi og batterilagring, vil kunne forsyne strømforbrukerne på mikronettet best mulig. Dette gjøres ved å bruke solinnstrålingsdatabaser og ut fra dagens solcelle- og batteriteknologi beregne hvor mye strøm som kan genereres og lagres. Jeg valgte å undersøke dette med bakgrunn i min interesse for solenergi og måter det kan bidra til å dekke energibehovet i samfunnet. I tillegg vil et mikronett med batterilagring kunne avlaste strømmettet og dermed bedre sikre strømforsyningen.

Jeg vil takke min veileder Yngve Birkelund, professor fornybar energi ved UiT, for god veiledning gjennom perioden masteroppgaven ble skrevet. Jeg vil også rette en takk til Skule Osmoen Haagensen ved Ren Røros AS for oppdraget, samt for tekniske data. I tillegg vil jeg takke Galåvolden Gård og Galåen Samdrift for at de delte sitt strømforbruk med meg.

Takk til min mor, familie, svigerfamilie og venner for støtte og oppmuntrende ord underveis i arbeidet, og spesielt i de periodene det stormet som verst. Sist, men ikke minst, vil jeg rette en stor takk til Linn Marita Holden for hennes enestående tålmodighet, forståelse, kjærlighet og omsorg i hverdagen.

Jeg hadde ikke klart dette uten dere.

Tromsø, 1. juni 2023



Eiliv Erik Ulrich Løchen

# Innholdsfortegnelse

Abstrakt

Forord

Innholdsfortegnelse

Figurliste

Tabelliste

Forkortelser

Nomenklatur

1	Innledning .....	4
1.1	Bakgrunn.....	4
1.2	Problemstilling.....	5
1.3	Leserveiledning.....	5
2	Teori.....	6
2.1	Solenergi .....	6
2.1.1	Sollys.....	6
2.1.2	Solceller .....	8
2.2	Batteri.....	21
2.2.1	Oppbygning og virkemåte.....	21
2.2.2	Litium-ion-batteri.....	22
2.3	Strømnettet.....	24
2.3.1	Dagens situasjon .....	24
2.3.2	Fremtidige utfordringer.....	24
2.3.3	Tap av kraft.....	25
2.3.4	Mikronett.....	26
2.4	Strømpris.....	29
3	Metode .....	31
3.1	Lokasjon.....	31

3.2	Estimeringsverktøy .....	39
3.2.1	PVGIS.....	40
3.2.2	Helningsvinkel og asimut .....	44
3.3	Batteri.....	46
3.4	Parametere.....	46
4	Resultat .....	47
4.1	Energiproduksjon.....	47
4.1.1	Solcellepanel på alle tak.....	49
4.1.2	Solcellepanel på tak B, C og D .....	54
4.1.3	Sammenligning .....	57
4.1.4	Strømforsyning over flere dager .....	61
5	Diskusjon .....	67
5.1	Økonomi .....	67
5.2	Solenergisystemet .....	68
6	Konklusjon.....	70
	Bibliografi.....	71

# Figurliste

Figur 2-1: Det elektromagnetiske spekteret (Knutsen, 2023).....	7
Figur 2-2: Atmosfærisk påvirkning på solinnstråling (Olomiyesan, Oyedum, Ugwuoke, Ezenwora, & Ibrahim, 2015) .....	8
Figur 2-3: Andeler av kumulativ energikapasitet per teknologi (IEA, 2023).....	8
Figur 2-4: Silisiumatomets elektronskall (Robson, 2006) .....	9
Figur 2-5: Kovalente bindinger i et silisiumkrystallgitter (Honsberg & Bowden, Semiconductor Structure, 2023) .....	9
Figur 2-6: Monokrystallinsk silisiumstruktur (Honsberg & Bowden, Single Crystalline Silicon, 2023).....	10
Figur 2-7: Polykrystallinsk silisiumstruktur (Honsberg & Bowden, Multi Crystalline Silicon, 2023) .....	10
Figur 2-8 Solcelle virkemåte (Mæhlum, 2023).....	11
Figur 2-9: Solcellepanelets oppbygning (Ecoprogetti, 2023) .....	13
Figur 2-10: Effekten av temperatur på IV-karakteristikken til en solcelle (Honsberg & Bowden, Effect of Temperature, 2023) .....	14
Figur 2-11: Solcelle effektivitet i laboratoriet (NREL, 2023) .....	19
Figur 2-12: Helningsvinkelen og asimut til et solcellepanel (SolarDesignGuide, 2023) .....	20
Figur 2-13: Virkemåte batteri (Gunvaldsen, Mathiesen, & Rosvold, 2023) .....	22
Figur 2-14: Ulike aktørers anslag på kraftbehovet fremover (Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon, 2022).....	25
Figur 2-15: Illustrasjon av et mikronett (CINELDI, 2023).....	27
Figur 2-16: Overføringskapasiteten for 1. juni 2023 mellom ulike strømsoner (Nord Pool Group, 2023).....	29
Figur 2-17: Detaljert beskrivelse av nettleiens oppbygning for næringskunder med forbruk over 100 000 kWh/år i 2022 (Røros E-verk Nett as, 2023) .....	30
Figur 2-18: Gjennomsnittlig spotpris på Røros for hver dag i 2022 (Nord Pool Group, 2023) .....	30
Figur 3-1: Røros kommune i forhold resten av Norge (Skjermdump: Google Maps).....	32
Figur 3-2: Galåen Samdrift sitt strømforbruk fra 2018 til 2022, samt gjennomsnittet for alle årene .....	33
Figur 3-3: Område med radius på 500 meter rundt Galåvolden Gård og Galåen Samdrift (Skjermdump: Norgeskart) .....	34

Figur 3-4: Egnede takområder for installasjon av solcellepanel på Galåvolden Gård og Galåen Samdrift (Skjermdump: Norgeskart) .....	35
Figur 3-5: Utklipp av produktdatablad for SunPower Maxeon 3 solcellepanel (SunPower Maxeon, 2020) .....	38
Figur 3-6: Forskjellige lokasjoner i Røros kommune (Skjermdump: Google Earth) .....	39
Figur 3-7: Solinnstrålingsdatabaser (European Union, 2023) .....	41
Figur 3-8: Sammenligning av faktisk generert strøm i 2022 og estimerer gjort av PVGIS.....	42
Figur 3-9: Effekten av en lavere temperatur på solcellens virkningsgrad sett i forbindelse med middeltemperaturen på Røros. ....	43
Figur 4-1: Strømproduksjon og strømforbruk ved solcellepanel på alle tak .....	50
Figur 4-2: Gjennomsnittsstrømforbruk for hver dag – hver måned, totalt for alle enheter i mikronettet .....	52
Figur 4-3: Gjennomsnittlig global solinnstråling for en dag i hver måned.....	53
Figur 4-4: Gjennomsnittlig produsert strøm hver måned .....	53
Figur 4-5: Strømproduksjon og strømforbruk ved solcellepanel på tak B, C og D.....	55
Figur 4-6: Strømproduksjon for et gjennomsnittsdøgn hver måned.....	56
Figur 4-7: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i mars .....	57
Figur 4-8: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i april.....	57
Figur 4-9: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i mai .....	58
Figur 4-10: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i juni.....	58
Figur 4-11: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i juli.....	58
Figur 4-12: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i august .....	59
Figur 4-13: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i september .....	59
Figur 4-14: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i oktober.....	59
Figur 4-15: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i november .....	60
Figur 4-16: Sammenligning mellom reelt (skalert) og estimert strømproduksjon for en tilfeldig uke i juni.....	61
Figur 4-17: Ukeoversikt juni for solenergisystem med et 100 kWh batteri .....	63
Figur 4-18: Ukeoversikt juni for solenergisystem med et 1000 kWh batteri .....	64
Figur 4-19: Ukeoversikt juni for solenergisystem med et 1200 kWh batteri .....	65
Figur 4-20: Oversikt fra mars til november for solenergisystem et uendelig stort batteri.....	66
Figur 4-21: Oversikt fra mars til november for solenergisystem 3500 kWh-batteri .....	66



## Tabelliste

Tabell 3-1: Variasjon i årlig solinnstråling innenfor mikronettet .....	33
Tabell 3-2: Tak som kan dekkes med solcellepanel, antall solcellepanel og strømforbruk ....	37
Tabell 3-3: Lokal variasjon i solinnstråling i Røros Kommune .....	38
Tabell 3-4: Normale takvinkler i Norge og deres tilhørende gjennomsnittlige årlige solinnstråling ved asimut $0^\circ$ .....	44
Tabell 3-5: Variasjon i asimut og den tilhørende gjennomsnittlige årlige solinnstråling ved $22^\circ$ helning .....	45
Tabell 3-6: Parametere som brukes i oppgaven .....	46
Tabell 4-1: Solinnstråling per areal og virkningsgrad for hver måned .....	48
Tabell 4-2: Månedlig strømproduksjon ved solcellepanel på alle tak .....	49
Tabell 4-3: Månedlig produksjon ved solcellepanel på tak B, C og D .....	54
Tabell 4-4: Timer strømproduksjonen overstiger forbruket, og hvor mange kWh overskuddet er for den respektive timen .....	62
Tabell 5-1: Estimerte kostnader ved installasjon av solcellepanel på tak B, C og D samt et batteri med kapasitet på 3,5 MWh .....	68

## Forkortelser

AC	Vekselstrøm (engelsk: alternating current)
AM	Spektrum av luftmasse (engelsk: Air Mass)
CINELDI	Centre for Intelligent Electricity Distribution
DC	Likestrøm (engelsk: direct current)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EERE	Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
ERA5	ECMWF Reanalysis 5
FF	Fyllfaktor (engelsk: fill factor)
IEA	International Energy Agency
MVA	Merverdiavgift
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
PN	Positiv-negativ
PR	Performance Ratio
PR	Ytelsesforhold (engelsk: performance ratio)
PV	Fotovoltaisk (engelsk: photovoltaic)
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
SARAH2	Solar And Radiation Archive
STC	Standard testbetingelser (engelsk: Standard Test Conditions)
UV	Ultrafiolett

## Nomenklatur

Symbol	Beskrivelse	Enhet
$\Delta P$	Endring i effekt	Watt [W]
$A$	Areal	m <sup>2</sup>
$B$	konstant	
$B'$	konstant	
$c$	Lysets hastighet = 299 792 458	m/s
$D$	Diffusivitetsparameter (engelsk: minority carrier diffusivity)	cm <sup>2</sup> /s
$E$	Energi	Joule [J]
$E_{G0}$	Båndgapsenergi ved 0 K (engelsk: band gap energy)	Joule [J]
$h$	Plancks konstant = $6,62607015 \cdot 10^{-34}$	J*s
$I$	Elektrisk strøm	Ampere [A]
$I_0$	Metningsstrøm (engelsk: saturation current)	Ampere [A]
$I_{MP}$	Strøm ved maksimalt effektpunkt	Ampere [A]
$I_{SC}$	Kortslutningsstrøm (engelsk: short-circuit current)	Ampere [A]
$k$	Boltzmann konstant = $1,380649 \cdot 10^{-23}$	J/K
$kWp$	Maksimal effekt solceller kan generere	Watt [W]
$L$	Diffusjonslengde (engelsk: minority carrier diffusion length)	µm
$l$	Lengde	meter [m]
$m_e^*$	Elektronets effektive masse	kg
$m_h^*$	Hullets effektive masse	kg
$N_D$	Tettheten av donor atomer	1/cm <sup>3</sup>
$n_i$	Indre bærerkonsentrasjon (engelsk: intrinsic carrier concentration)	1/cm <sup>3</sup>
$P$	Effekt	Watt [W]
$P_{in}$	Effekt fra solen	Watt [W]
$P_m$	Maksimal effekt	Watt [W]
$P_{MP}$	Effekt ved maksimalt effektpunkt	Watt [W]
$q$	Elektrisk ladning	Coloumb [C]
$R$	Resistans	Ohm [Ω]
$S_A$	Solinnstråling per areal	kWh/m <sup>2</sup>
$T$	Temperatur	°C
$T$	Temperatur	Kelvin [K]
$V$	Elektrisk spenning	Volt [V]
$V_{G0}$	Båndgapsspenning ved 0 K (engelsk band gap voltage)	Volt [V]
$V_{MP}$	Spenning ved maksimalt effektpunkt	Volt [V]
$V_{OC}$	Åpen krets spenning (engelsk: open-circuit voltage)	Volt [V]
$\gamma$	konstant	
$\eta$	Virkningsgrad	%
$\lambda$	Bølgelengde	meter [m]
$\rho$	Resistivitet	Ωm
	Gigawatt	GW

Watttime	Wh
Kilogram	kg
Meter	m
Kvadratmeter	m <sup>2</sup>
Sekund	s
Kilowatttime	kWh
Kilometer	km
Kilovolt	kV
grader	°

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Strøm har blitt avgjørende for menneskets trivsel og vår moderne livsstil. Uten strøm ville livene våre blitt snudd på hodet og hverdagen hadde bydd på utfordringer mange ikke visste eksisterte. Vi bruker strøm til alt, fra elbiler til elektriske peiser. Statnett estimerer at kraftforbruket i Norge kan øke med opptil 85% frem til 2050 (Statnett, 2023). Grunnen til økningen er Norges mål om netto null utslipp av klimagasser, som krever en utstrakt elektrifisering. Ved økende behov for strøm trengs det også en økning i produksjon av strøm, samt en økning i kapasiteten på kraftnettet for å transportere denne strømmen fra produsent til forbruker. Denne økningen i kraftforbruk må dekkes, og den måten er ved hjelp av fornybar energi.

Fornybar energi er vi godt kjent med i Norge, og over 98% av strømproduksjonen kommer fra fornybare energikilder, der vannkraft er den desidert største bidragsyteren (NVE, 2023). Problemet ligger der at det kun er en viss mengde vannkraft tilgjengelig, og man kan ikke legge alle Norges vassdrag i rør. Noe som det derimot finnes uendelige mengder av, er sollys. Solen generer enorme mengder energi hele tiden, og alt vi trenger å gjøre for å høste denne energien, er å installere solenergisystemer. Solcellepanel er en av måtene man kan utnytte solenergien på, og de siste årene har teknologien og prisen falt i takt med den økte etterspørselen av denne teknologien. Solcellepanel kan installeres for å hjelpe til å dekke deler av energibehovet, og etter noen år vil de produsere strøm for deg helt gratis. Ved å produsere strømmen der den forbrukes, minskes også behovet for å transportere den betraktelig. Transport av strøm over lengre distanser er kostbart og ineffektivt. I et langt land som Norge, der det kan være langt fra produsent til forbruker, vil det å kunne produsere strømmen lokalt, forbruke den lokalt og lagre overskuddet lokalt, hjelpe på å avlaste strømmettet, samtidig som det øker forsyningssikkerheten.

Opphavet til problemstillingen som belyses i denne masteroppgaven er at strømmettet i Norge er i behov for en oppgradering på grunn av det stadig økende kraftforbruket. Samtidig ønsker man å implementere mer fornybar energi, som solceller.

## **1.2 Problemstilling**

Målet med denne oppgaven er å utforske hvilke solenergisystem som vil være de mest hensiktsmessige for å minimere belastningen på det lokale strømnettet. Dette skal gjøres ved å se på dimensjonering av solenergianlegg og batteripakker i et mikronett.

## **1.3 Leserveiledning**

Oppgaven er strukturert med 6 kapitler, der kapittel 1 gir en introduksjon til oppgaven. Kapittel 2 gir den teoretiske bakgrunnen som er nødvendig for å forstå metoden, bli gjennomgått. Dette innebærer en oversikt over hva sollyset er, og hvordan solceller kan bruke sollyset til å generere strøm. Her gis også en oversikt over hva et batteri er, samt det norske strømnettet og et innblikk i strømprisen. I kapittel 3 presenteres metodene som er brukt til å fremstille resultatene. Det innebærer å se på hvor solenergisystemet vil være plassert, og hvordan energiproduksjon på dette stedet kan bli beregnet ved hjelp av solinnstrålingsdata og andre parametere. Resultater presenteres i kapittel 4, som innebærer mengden energiproduksjon, og forskjellige situasjoner der energiproduksjon på forskjellige tidsaspekter settes opp mot forbruk og lagring. I tillegg blir det vist noen økonomiske aspekt. Til slutt kommer diskusjon og konklusjon i henholdsvis kapittel 5 og 6, som samler mine tanker og meninger om resultatene.

## 2 Teori

### 2.1 Solenergi

Livet på jorden ville ikke vært mulig uten solen og energien den utstråler. Solen er kilden til nesten all energi vi har. Planter og dyr bruker den for varme og mat, men vi mennesker bruker også solens energi til andre formål. Gjennom solens oppvarming av atmosfæren dannes det blant annet vind, havstrømmer og nedbør. En fellesnevner for disse er at de kan brukes til å drive forskjellige former for turbiner som kan generere elektrisitet. I tillegg ville ikke fotosyntese vært mulig uten solens energi, og ved hjelp av vann og karbondioksid dannes biomasse som kan omdannes til varmeenergi ved hjelp av forbrenningsprosesser. Selv ikke-fornybare energikilder som kull og olje har sitt opphav i solens energi og biomasse, bare at det har blitt omdannet og lagret i millioner av år. Dette er indirekte måter å benytte seg av solens energi på, men det finnes også direkte måter å utnytte energien, som ved å omdanne den til elektrisk energi via solkraft. En måte å gjøre dette på er med fotovoltaisk effekt, kjent som solceller (Hofstad, 2023).

#### 2.1.1 Sollys

Sollys består av elektromagnetisk stråling. Elektromagnetisk stråling er et bredt spekter av forskjellige bølgelengder av fotoner, som vist i Figur 2-1. Bakgrunnen til de forskjellige bølgelengdene kommer av vibrasjonen hos fotonene. Langsom vibrasjon gir lange bølgelengder, rask vibrasjon gir korte bølgelengder (Knutsen, 2023). Energien til fotonet ( $E$ ) er

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

hvor

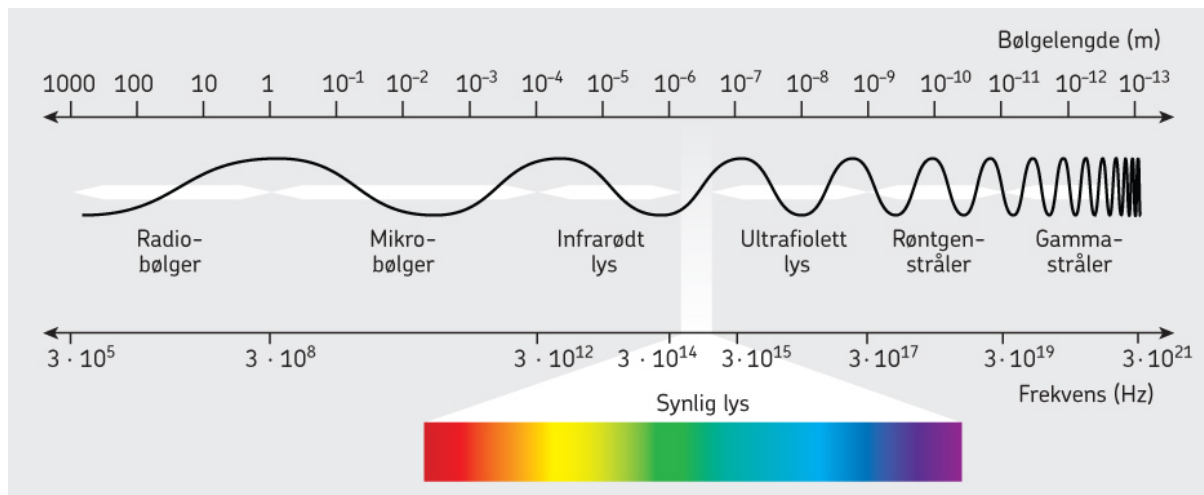
$\lambda$  = fotonets bølgelengde

$h$  = Plancks konstant

$c$  = lysets hastighet

De to sistnevnte er konstanter, som betyr at energien til fotonet er avhengig av bølgelengden. Bølgelengden er avstanden mellom to bølger. Desto mindre avstanden er mellom bølgene, jo mindre er bølgelengden og høyere er energien til fotonet. Den synlige delen av spekteret er

fotoner med en bølgelengde på mellom ca. 400 nm (fiolett) og 750 nm (rødt) (Honsberg & Bowden, Energy of Photon, 2023).



Figur 2-1: Det elektromagnetiske spekteret (Knutsen, 2023)

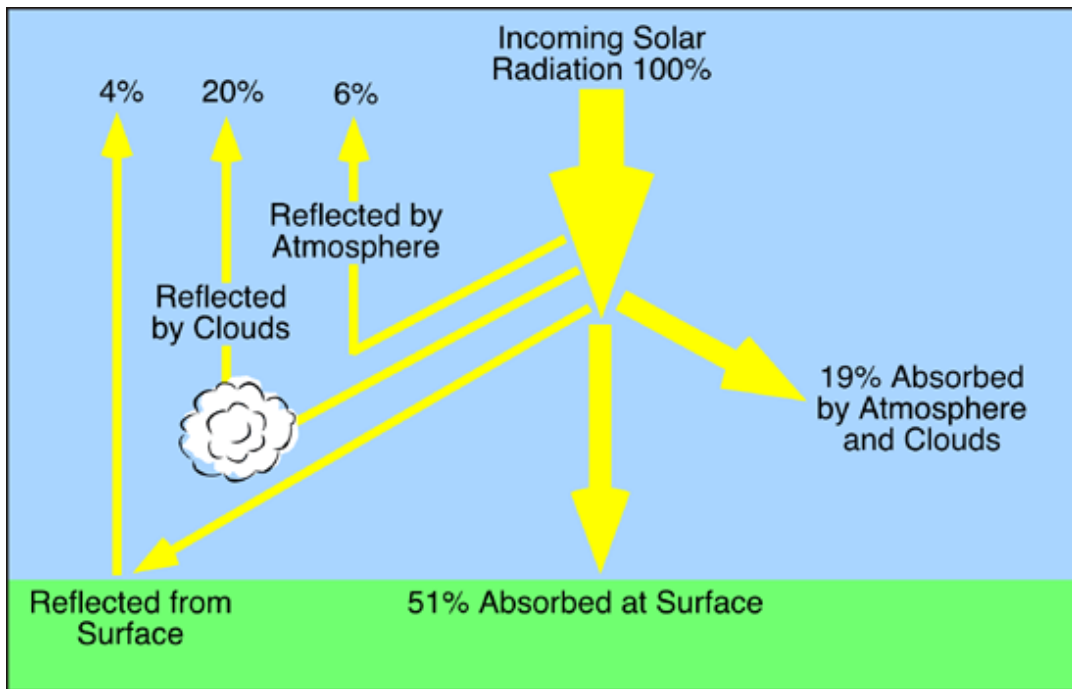
### 2.1.1.1 Atmosfærisk påvirkning

Mengden sollys som når jordens overflate, også kjent som solinnstråling, varierer avhengig av en rekke faktorer, inkludert tid på døgnet, tid på året og plasseringen på jorden. I gjennomsnitt mottar jordens atmosfære rundt 1370 W/m<sup>2</sup> til enhver tid (Hofstad, 2023).

Atmosfæren har stor innvirkning på hvor mye solinnstråling som når jordens overflate. Ved utkanten av jordens atmosfære, er solinnstrålingen 100%, som vist i Figur 2-2. Atmosfærens påvirkning kan deles opp i to kategorier, der den ene er refleksjon og spredning, mens den andre er absorpsjon. Ca. 30% blir reflektert tilbake ut i verdensrommet, av selve atmosfæren, skyer og jordoverflaten. Den andre kategorien er absorpsjon og spredning. Dette skjer i atmosfæren og i skyene, og er en av grunnene til at det er varmt på jorden. Energien fra solen bremses ned og blir omdannet til varme. Noen av fotonene er så små at de kolliderer med stoffene i atmosfæren og blir spredt. Det er grunnen til at himmelen er blå, fotoner med høy energi kolliderer med atmosfæren og vi ser det som blått lys. De resterende 51% som ikke blir reflektert, absorbert eller spredt, når jordoverflaten og kan utnyttes av mennesker, planter og dyr (Olomiyesan, Oyedum, Ugwuoke, Ezenwora, & Ibrahim, 2015).

Det er verdt å merke seg at prosentandelene i Figur 2-2 er omtrentlige, og vil selvfølgelig variere ut fra hvor mye damp det er i atmosfæren, og om det er skyfritt eller tett skydekke.

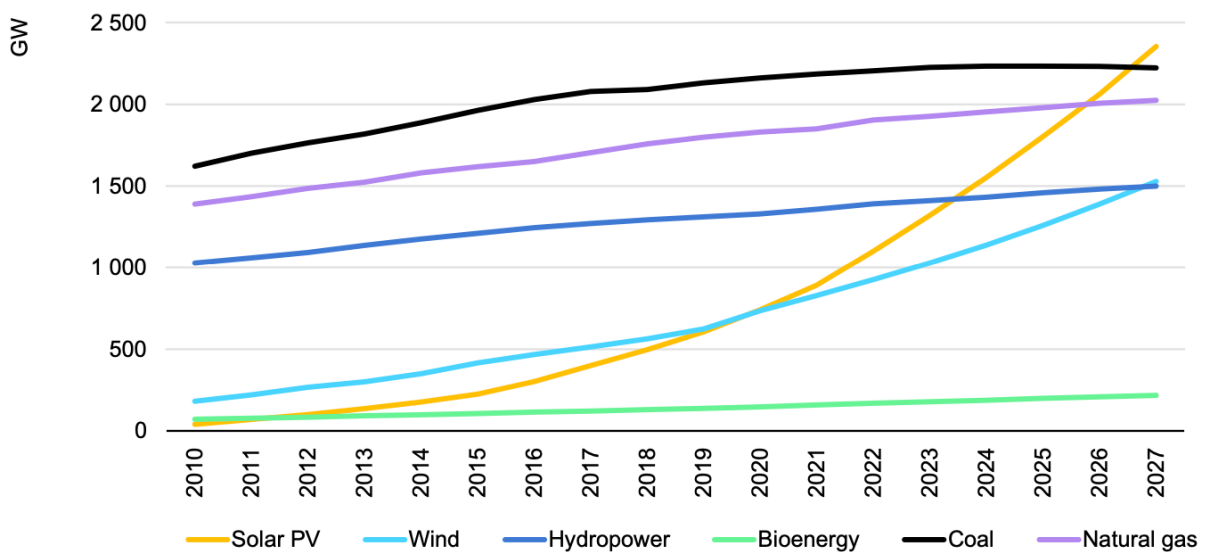




Figur 2-2: Atmosfærisk påvirkning på solinnstråling (Olomiyesan, Oyedum, Ugwuoke, Ezenwora, & Ibrahim, 2015)

## 2.1.2 Solceller

Solceller, også kjent som fotovoltaiske celler (fra *foto* som betyr lys og *voltaisk* som betyr elektrisitet), omdanner energi som faller på den til elektrisk strøm. I en verden der energibehovet stadig blir større er solceller en viktig faktor i å forsyne verden med fornybar energi, og som Figur 2-3 viser tar den stadig en større markedsandel av verdens energiproduksjon. Ved å integrere solenergi i energiforsyningen reduserer man behovet for skadelige fossile energikilder og bidrar til å redusere klimagassutslipp.

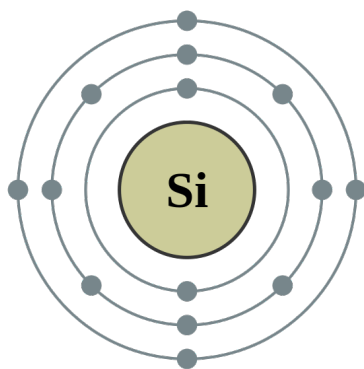


Figur 2-3: Andeler av kumulativ energikapasitet per teknologi (IEA, 2023)

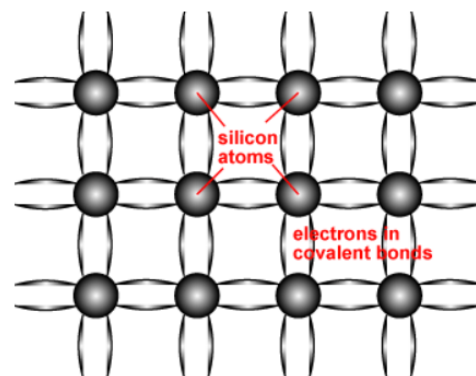
I tillegg til å monteres i urbane områder, tilbyr solceller mulighetene for desentralisert energiproduksjon i fjerntliggende områder der det ikke er tilgang til strømmettet. Skinner solen, kan solceller lage strøm, uavhengig av hvor det er på kloden. Dette fører til energiuavhengighet og økt energisikkerhet, samt muligheten til å produsere energi lokalt. Slik kan samfunn og husholdninger være mindre avhengig av eksterne energikilder. En annen viktig faktor som gjør solceller attraktivt er at man unngår å forstyrre naturen med store inngrep, som man ser ved utbygging av vindmølleparker og oppdemning av landområder for vannkraftverk. Solcellepanel kan monteres på eksisterende bygninger, med minimal sjenanse for naturen.

### 2.1.2.1 Oppbygning og virkemåte

Solceller er laget av halvledermaterialer. Det er en gruppe stoffer som leder strøm dårligere enn metaller, som kobber, men bedre enn isolatorer, som plast. Et av de vanligste halvledermaterialene er krystallinsk silisium (på engelsk: crystalline silicon). Silisium har atomnummer 14 og er i karbongruppen. Det er et hardt og sprøtt stoff som har samme struktur som diamant (Kofstad & Pedersen, 2023). Med atomnummer 14 har silisium totalt 14 elektroner, og som Figur 2-4 illustrerer befinner fire av dem seg i det ytterste elektronskallet og er såkalte valenselektron. Ifølge oktettregelen er åtte valenselektroner den mest stabile elektronfordelingen. Dermed er skallet bare halvfullt og silisiumatomet vil alltid se etter måter å fylle det ytterste skallet på, som det gjør ved å dele et elektronpar med fire nærliggende atomer i kovalente bindinger som vist i Figur 2-5 (Honsberg & Bowden, Semiconductor Structure, 2023). Det er slik silisiumets krystallinske struktur dannes.



Figur 2-4: Silisiumatometts elektronskall (Robson, 2006)

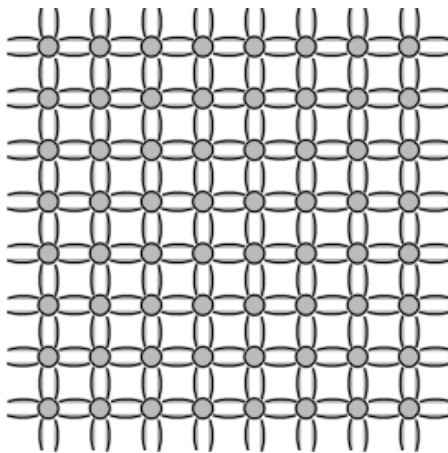


Figur 2-5: Kovalente bindinger i et silisiumkrystallgitter (Honsberg & Bowden, Semiconductor Structure, 2023)

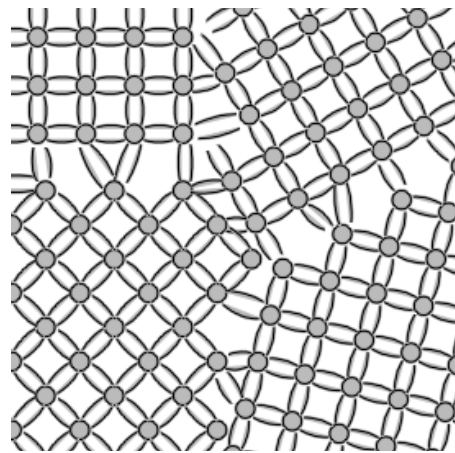
De fleste silisiumsolceller er laget av silisiumskiver, som enten kan være monokrystallinske eller polykrystallinske. Hovedforskjellen på disse er at monokrystallinske produseres ved å

bruke single silisiumkrystaller til å lage cellene, så gitterstrukturen vist i Figur 2-6 strekker seg gjennom hele cellen (Honsberg & Bowden, Single Crystalline Silicon, 2023).

Polykrystallinske har celler laget av flere fragmenter av silisium som er smeltet sammen, og gitterstrukturen er derfor deformert som man ser på Figur 2-7. Dette fører til at de ikke har like høy krystallinsk renhet som monokrystallinske celler, som påvirker de elektriske egenskapene (Honsberg & Bowden, Multi Crystalline Silicon, 2023). Utover dette er virkemåten til hvordan strøm blir dannet den samme, men på grunn av bedre gitterstruktur er monokrystallinske solceller mer effektive til å konvertere sollys om til strøm enn polykrystallinske solceller.



Figur 2-6: Monokrystallinsk silisiumstruktur (Honsberg & Bowden, Single Crystalline Silicon, 2023)

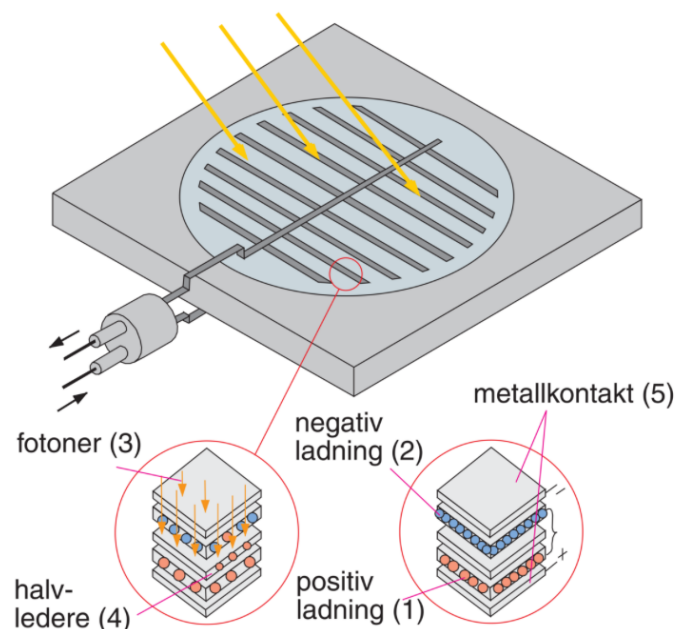


Figur 2-7: Polykrystallinsk silisiumstruktur (Honsberg & Bowden, Multi Crystalline Silicon, 2023)

Solcellen består som nevnt av halvledermaterialet krystallinsk silisium, som er en dårlig leder av elektrisitet. Det er fordi det ikke er noen elektroner som beveger seg fritt, som betyr at alle elektronene er i en lavenergitilstand på valensbåndet. Hvis rent silisium tilføres energi, som for eksempel varme, kan det føre til at noen elektroner bryter seg fri fra bindingene og etterlater seg «hull». Disse frie elektronene er i en høyenergitilstand, og har eksitert fra valensbåndet til ledningsbåndet. Bindingen mellom atomene har dermed en energi som fører til to distinkte energitilstander for elektronene. Elektronet kan ikke være et sted mellom høy- eller lavenergitilstand. Det er enten i en lavenergitilstand i valensbåndet, eller den har fått en minimumsenergi til å eksitere til ledningsbåndet. Denne minimumsenergien kalles båndgapet (engelsk: band gap) til en halvleder (Honsberg & Bowden, Conduction in Semiconductors, 2023). De frie, eksiterte, elektronene beveger seg gjennom silisiumkrystallgitteret i ledningsbåndet og søker etter andre ledige hull og danner slik en elektrisk strøm. Problemet er at mangelen på frie elektroner i rent silisium begrenser nytten deres. Dette kan løses ved å tilføre andre atomer til det krystallinske silisiumet, som gjør at det blir «dopet». To stoffer

som ofte blir brukt til dette er fosfor og bor. Grunnen er at fosfor har fem valenselektroner, altså ett valenselektron *mer* enn silisium, mens bor har tre valenselektroner – ett *mindre* enn silisium (Aldous & Homer, 2023).

Virkemåten til en solcelle kan forklares med fem punkter som vist i Figur 2-8, og er videre i dette underkapittelet referert til som (1), (2), (3), (4) og (5). Ser man først på den ene komponenten i en solcelle, finner man fosfor. Fosforatomene vil binde seg med silisiumatomene, men siden fosfor har fem valenselektron mens silisium har fire, vil det totalt være ni valenselektron, altså vil fosfor-silisiumblandingen ha ett elektron for mye. Dette elektronet deltar ikke i bindingen, men holdes likevel fast av et positivt proton i fosforkjernen. Slik får det en negativ ladning (2) og dette kalles for negativ-doping (n-doping). Tilføres det energi i denne n-dopede tilstanden vil man få en annen situasjon enn det beskrevet med rent silisium tidligere, da det vil kreve mindre energi for å frigjøre ett fosforelektron ekstra siden det ikke er i en binding. Dermed vil flere elektroner bryte seg fri som fører til en betydelig økning av frie elektroner og overlegen ledningsevne, sammenlignet med rent silisium (Aldous & Homer, 2023). På den andre komponenten finner man bor, og det har som nevnt kun tre valenselektroner. Det fører til et underskudd av frie elektroner og mange ledige hull, som gir en positiv ladning (1) og kalles positiv-doping (p-doping) (Mæhlum, 2023).



Figur 2-8 Solcelle virkemåte (Mæhlum, 2023)

Frem til doping var de to silisiumkomponentene elektrisk nøytrale, men når den n-dopede og den p-dopede siden føres sammen dannes det elektrisk felt. Det elektriske feltet dannes ved at de ledige hullene på den p-dopede siden tiltrekker seg de frie elektronene på den n-dopede siden og det blir et race om å få fylt hullene raskest mulig. Til slutt blir det likevekt mellom den p-dopede og n-dopede siden, og det vil være et elektrisk felt som skiller de to sidene. Feltet fører til at elektroner fra p-siden kan forflytte seg til n-siden, men ikke motsatt, som er den retningen elektronene egentlig ønsker å bevege seg, siden det er der de ledige hullene er. Elektronene har altså ikke mulighet til å krysse dette feltet kalt PN-overgangen (positiv-negativ-overgangen), uten at de utsettes for energi, som sollys. Om de blir utsatt for sollys (3) vil hvert foton med tilstrekkelig båndgapsenergi frigjøre et elektron fra elektron-hull-paret, og danne et nytt hull. Om dette skjer i nærheten av PN-overgangen eller hvis et fritt elektron og et hull tilfeldigvis treffes av et foton med riktig bølgelengde, vil elektronet bli sendt til n-siden og hullet til p-siden (4). Dette vil forstyrre likevekten, og om elektronene da får en ekstern strømbane i form av en metallkontakt (5) vil de strømme gjennom denne til p-siden for å kunne danne elektron-hull-par der og gjøre et arbeid på veien (Mæhlum, 2023) (Aldous & Homer, 2023). Elektronstrømmen gir strøm og cellens elektriske felt spenning, og produktet av dette gir elektrisk effekt, vist som

$$P = VI \quad (2.2)$$

hvor:

$P$  = elektrisk effekt

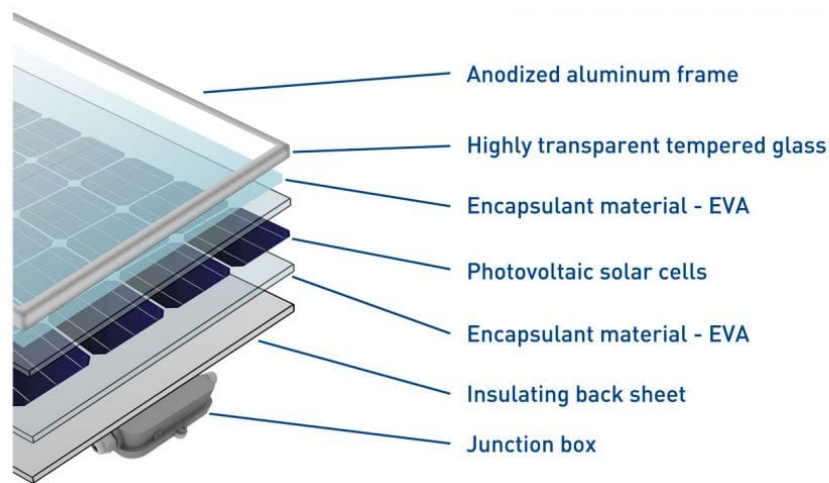
$V$  = spenning

$I$  = strøm

Det skiller mellom solceller og solcellepanel. Et solcellepanel med krystallinske silisiumsceller består av flere serie- og parallellkoblede solceller. Som Figur 2-9 viser består et solcellepanel av flere komponenter. Øverst og rundt er det aluminiumsramme som holder konstruksjonen sammen og stabiliserer hele panelet. Deretter er det et lag med tynt herdet glass, som beskytter cellene mot naturelementer og flyvende gjenstander. Under glasset og rundt selve solcellen er det en gjennomsiktig membran som er en ekstra beskyttelse mot fuktighet og andre små partikler som kan snike seg under glasset. Den siste essensielle delen

er en koblingsboks som er montert på bakplaten. Denne boksen er koblingen mellom solcellepanelet og det eksterne elektriske systemet (Ecoprogetti, 2023).

Utover selve solcellepanelet trengs det et styringssystem for å ha oversikt over solenergianlegget, en regulator som sørger for at strømmen som genereres av solcellene er stabil og konstant. Det behøves også vekselretter som konverterer likestrøm (DC) produsert av solcellene til vekselstrøm (AC), som er den typen elektrisitet som vanligvis brukes i hjem og bygninger. I tillegg kan man ha batterier som lagrer produksjonsoverskuddet.



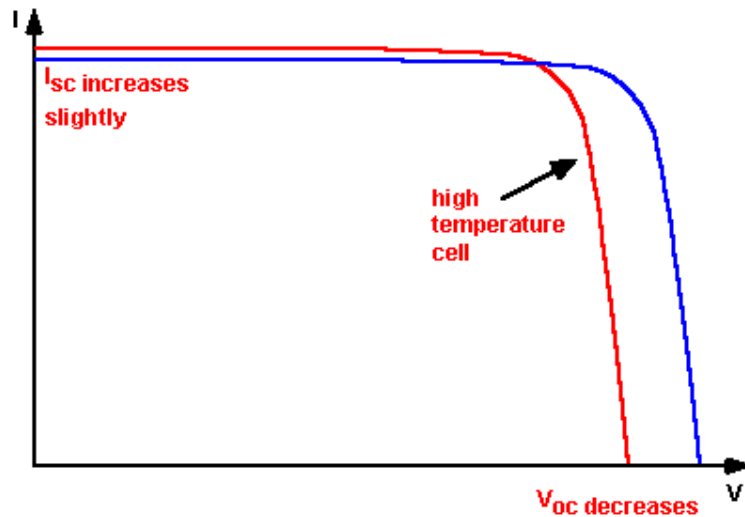
Figur 2-9: Solcellepanelets oppbygning (Ecoprogetti, 2023)

### 2.1.2.2 Temperaturpåvirkning

Denne oppgaven er skrevet i samarbeid med Ren Røros, som er lokalisert på Røros der det er lave temperaturer. Dermed er det viktig å se på effekten temperaturen har for solcellens evne til å generere strøm.

Effektiviteten til krystallinske silisiumceller avtar med økende temperatur. Dette er fordi materialene som brukes i silisiumsolceller har visse elektriske egenskaper som er temperaturavhengige. Øker temperaturen vil båndgapet til halvlederen reduseres og dermed vil energien til elektronene øke. Dette fører igjen til at det behøves lavere energi til å bryte bindingen. Med andre ord vil en økning av temperatur redusere båndgapet (Honsberg & Bowden, Effect of Temperature, 2023). Ved redusert båndgap vil solcellen i mindre grad absorbere fotoner med varierende bølgelengder. Fotoner med lavere energi vil ikke ha nok energi til å eksitere elektroner. Det kan føre til at en større del av sollyset ikke blir utnyttet til å generere elektrisitet, som gir lavere total effektivitet til cellen. Fotonene med større energi enn båndgapet vil bli absorbert av cellen i form av varme, og reduserer båndgapet ytterligere.

Det er ikke bare båndgapet som påvirkes av temperaturen i solcellen, og den viktigste faktoren er spenningen ved åpen krets  $V_{OC}$  (engelsk: open-circuit voltage). Figur 2-10 er en IV-kurve som viser effekten av økt temperatur til en typisk solcelle, der  $I_{SC}$  er kortslutningsstrømmen (engelsk: short-circuit current) (Honsberg & Bowden, Effect of Temperature, 2023).



Figur 2-10: Effekten av temperatur på IV-karakteristikken til en solcelle (Honsberg & Bowden, Effect of Temperature, 2023)

$V_{OC}$  avtar med temperaturen på grunn av temperaturavhengigheten til metningsstrømmen  $I_0$ . Ligningen for metningsstrømmen  $I_0$  for den ene siden av PN-overgangen er beskrevet slik

$$I_0 = qA \frac{Dn_i^2}{LN_D} \quad (2.3)$$

hvor:

$q$  = den elektroniske ladningen

$A$  = areal

$D$  = diffusivitetsparameter. Et mål på diffusiviteten (evnen en elektrisk lading har til å spre seg gjennom et materiale) til minoritetsbæreren for silisium som en funksjon av doping.

$L$  = minoritetsbærerens diffusjonslengde

$N_D$  = doping, tettheten av donor atomer

$n_i$  = den indre bærerkonsentrasjonen

Flere av disse parameterne er til en viss grad temperaturavhengige, men den mest signifikante parameteren er den indre bærerkonsentrasjonen  $n_i$ . Den indre bærerkonsentrasjonen er et mål på hvor mange elektron-hull-par som deltar i overføringen av indre energi (ledning). Det er dermed avhengig av båndgapsenergien, der lavere båndgap gir høyere indre bærerkonsentrasjon samt energien som bærerne har, der høyere temperatur gir høyere indre bærerkonsentrasjoner (Honsberg & Bowden, Effect of Temperature, 2023). Ligningen for den indre bærerkonsentrasjonen er

$$n_i^2 = 4 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) = BT^3 \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \quad (2.4)$$

hvor:

$T$  = temperatur

$h$  &  $k$  = Plancks konstant og Boltzmann konstant

$m_e^*$  &  $m_h^*$  = den effektive massen til henholdsvis elektroner og hull

$E_{G0}$  = båndgapsenergien ved temperatur 0 K

$B$  = konstant som er uavhengig av temperatur

Nå kan man erstatte ligning (2.4) med deler av ligning (2.3) og får et nytt uttrykk for  $I_0$

$$I_0 = qA \frac{D}{LN_D} BT^3 \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \approx B'T^\gamma \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \quad (2.5)$$

I ligning benyttes konstanten  $\gamma$  i stedet for tallet 3 for å gjøre temperaturavhengigheten til  $I_0$  nyttig for de andre materialparameterne. I tillegg settes  $B = B'$  for å kunne skille tilnærmingen i ligning (2.5) fra tidligere  $B$ . For silisiumsolceller ved romtemperatur vil metningsstrømmen  $I_0$  omtrent dobles for hver 10 °C økning i temperatur (Honsberg & Bowden, Effect of Temperature, 2023).

For å kalkulere effekten  $I_0$  har på  $V_{OC}$  settes ligning (2.5) inn i uttrykket for  $V_{OC}$



$$\begin{aligned}
V_{OC} &= \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0}\right) = \frac{kT}{q} [\ln I_{SC} - \ln I_0] \\
&= \frac{kT}{q} \ln I_{SC} - \frac{kT}{q} \ln \left[ B' T^\gamma \exp\left(-\frac{qV_{G0}}{kT}\right) \right] \\
&= \frac{kT}{q} \left( \ln I_{SC} - \ln B' - \gamma \ln T + \frac{qV_{G0}}{kT} \right)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

hvor:

$V_{G0}$  = båndgapsspenningen ved temperatur 0 K

Videre antar man at derivatet av  $V_{OC}$  ikke er avhengig av derivatet av  $I_{SC}$ , som gir

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = \frac{V_{OC} - V_{G0}}{T} - \gamma \frac{k}{q} \tag{2.7}$$

Ligning (2.7) viser at temperaturfølsomheten til en solcelle er avhengig av  $V_{OC}$ , der høyere spenning gir lavere temperatursensitivitet. Setter man inn verdier for silisium inn i ligningen (Honsberg & Bowden, Effect of Temperature, 2023), finner man at reduksjonen til  $V_{OC}$  som en funksjon av temperatur er

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = -\frac{V_{G0} - V_{OC} + \gamma \frac{kT}{q}}{T} \approx -2,2 \frac{mV}{^\circ C} \tag{2.8}$$

$I_{SC}$  øker litt med temperaturen siden  $E_{G0}$  avtar og flere fotoner har nok energi til å lage elektron-hull-par. Som ligning (2.9) viser har den kun en liten effekt, og temperaturavhengigheten til  $I_{SC}$  for silisium er

$$\frac{1}{I_{SC}} \frac{dI_{SC}}{dT} \approx 0,0006 = 0,06\% \text{ per } ^\circ C \tag{2.9}$$

Endringen til  $I_{SC}$  med temperatur er mindre enn endringen til  $V_{OC}$ . Nå kan man finne temperaturavhengigheten for maksimal utgangseffekt for en solcelle. For å gjøre dette må man først se på den maksimale effekten til solcellen, som bestemmes av blant annet parameteren fyllfaktor (FF). FF sier noe om solcellens kvalitet og brukes til å kvantifisere effektiviteten til solcellepanelet. (Honsberg & Bowden, Fill Factor, 2023).

$I_{SC}$  og  $V_{OC}$  er henholdsvis maksimal strøm og spenning fra en solcelle, men ved begge disse punktene er effekten fra solcellen null. FF, sammen med  $I_{SC}$  og  $V_{OC}$  bestemmer den effekten til solcellen ved maksimalt effektpunkt ( $P_{MP}$ ) (Honsberg & Bowden, Fill Factor, 2023).

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (2.10)$$

Deretter vil man kunne tilnærmet bestemme temperaturavhengigheten til en silisiumbasert solcelle slik

$$\frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} \approx \left( \frac{1}{V_{OC}} \frac{dV_{OC}}{dT} - \frac{1}{T} \right) \approx -0,0015 \text{ per } ^\circ\text{C} \quad (2.11)$$

Til slutt kan man bestemme effekten av temperatur på den maksimale effekten  $P_m$  ved å bruke  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  og  $FF$  med følgende ligning

$$P_{Mvar} = \frac{1}{P_{MP}} \frac{dP_{MP}}{dT} = \frac{1}{V_{OC}} \frac{dV_{OC}}{dT} + \frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} + \frac{1}{I_{SC}} \frac{dI_{SC}}{dT} \approx -0,005 \frac{W}{^\circ\text{C}} \quad (2.12)$$

Disse beregningene viser at maksimumseffekten synker med 0,5% per grad celsius økning.

### 2.1.2.3 Solcellenes virkningsgrad

Virkningsgrad betyr hvor effektivt en solcelle konverterer sollys til elektrisitet. Dette er forholdet mellom produsert elektrisk energi, og hvor mye solenergi som treffer solcellen.

Alle solceller testes under samme forhold for at man skal kunne gi en rettferdig indikasjon på hvor effektive solcellene er sammenlignet med hverandre. Disse forholdene omtales som standard testbetingelser (STC) som er:  $1000 \text{ W/m}^2$  sollys,  $25^\circ\text{C}$  og spektrum av luftmasse (AM) 1,5 (SunPower Maxeon, 2020). Sistnevnte sier noe om hvor langt sollyset reiser gjennom atmosfæren før den treffer en overflate, i forhold til den korteste banen sollyset har som er når den står midt på himmelen.

Som vist i Figur 2-3 har solcellenes popularitet økt kraftig de siste ti årene, og det har gjort at utviklingen av solcellene over den samme perioden også har vært enorm, som vist på Figur 2-11. Tallene fra National Renewable Energy Laboratory (NREL) vist i figuren er fra optimale testforhold på laboratorier, noen med konsentrert sollys, og de samme resultatene vil ikke kunne gjenskapes utenfor laboratorier på det kommersielle markedet (NREL, 2023).

Likevel kan det gi et innblikk i hvordan fremtidens solceller kanskje vil se ut. Solcellen med

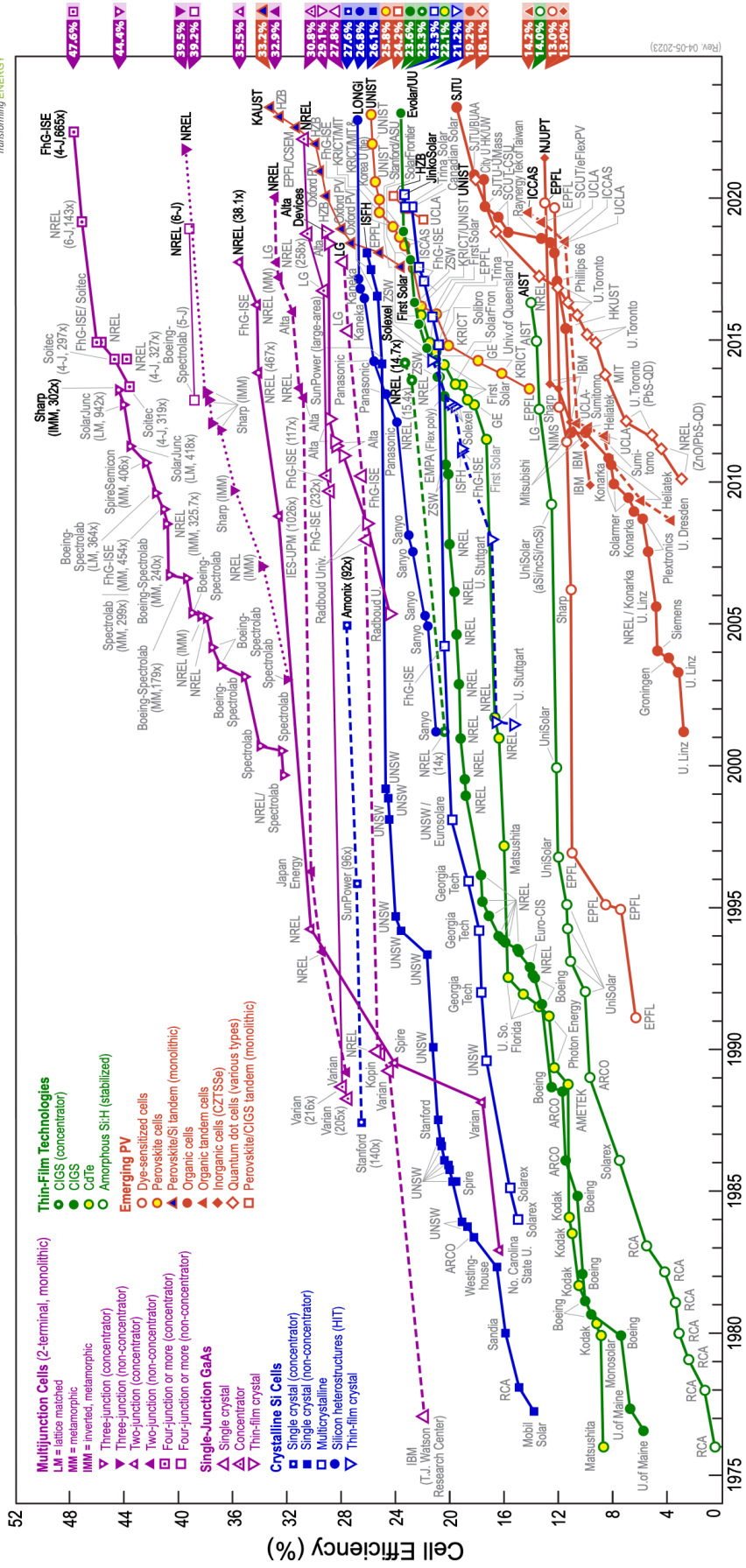
høyest virkningsgrad er en såkalt fireovergangscelle (fire PN-overganger) med en virkningsgrad på 47,6%. En fireovergangscelle tilhører kategorien multiovergangssolceller, som er en type solceller der flere solceller av ulike materialer er stablet oppå hverandre. Grunnen til at slike solceller har en betydelig høyere virkningsgrad er fordi hvert PN-overgang har forskjellige båndgap, for å kunne dra nytte av et større felt av det elektromagnetiske spekteret (EERE, 2023).

I hovedsak så er det fire typer solceller; mono- og polykrystallinske silisiumsolceller, tynnfilmceller og organiske solceller. Krystallinsk silisium står for mer enn 95% av den totale solcelleproduksjonen. Monokrystallinske enkeltovergangsceller har en kommersiell virkningsgrad på mellom 20%-25%, og har den største markedsandelen de siste årene med 85% av det krystallinske silisiummarkedet. Polykrystallinske enkeltovergangsceller er fremdeles i produksjon fordi de er så billige å lage, men har en lavere kommersiell virkningsgrad på mellom 18%-21% (Masson & Kaizuka, 2022).

Tynnfilmceller dannes på en annen måte enn krystallinske silisiumsolceller, da de blir produsert ved å avsette ekstremt tynne lag av fotovoltaiske halvledermaterialer på et underlag, som glass, rustfritt stål eller plast. Solceller lagd med halvleder med forbindelser av typen III-V, der III-V refererer til en av hovedgruppene i det periodiske system, dannes ved å bruke stoffene som Galliumarsenid (GaAs) på Germanium (Ge)-substrater og har høy virkningsgrad på mellom 25%-30% ved ikke-konsentrert sollys. Disse er kostbare og egnes ikke for kommersiell bruk, men kan brukes til eksempelvis romapplikasjoner. Tynnfilmceller var kjent for å ha en lavere virkningsgrad enn krystallinske silisiumsolceller, men dette har endret seg i senere tid. Nå kan det være billigere å produsere tynnfilmceller fordi produksjonsprosessen har utviklet seg dit at det er færre steg fra råvarer til modul og dermed et redusert energibehov (Masson & Kaizuka, 2022).

Organiske tynnfilmceller bruker fargestoff eller organiske halvledere til det primære laget som absorberer lys og konverterer det til energi. Interessen for denne teknologien er økende, og det er her forskere gjør de største fremskrittene de siste årene, som man også kan se på Figur 2-11 (Masson & Kaizuka, 2022).

# Best Research-Cell Efficiencies



(Fig. 2-11: Solcelle effektivitet i laboratoriet (NREL, 2023))

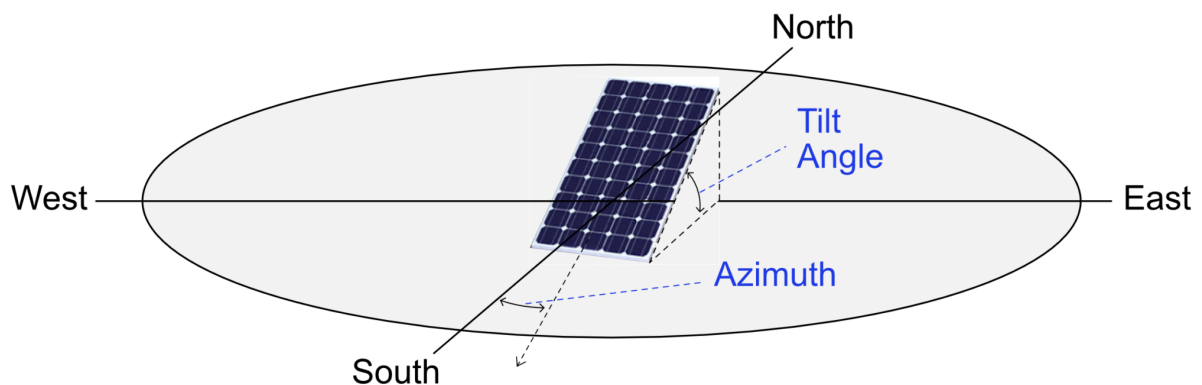
Figur 2-11: Solcelle effektivitet i laboratoriet (NREL, 2023)

#### 2.1.2.4 Helningsvinkel og Asimut

Hvor mye elektrisitet et solcellepanel kan produsere avhenger av flere faktorer. Det er blant annet mengden sollys det mottar, effektiviteten til solcellene og størrelsen på panelet.

Generelt er solcellepaneler mest effektive til å konvertere sollys til elektrisitet når de er orientert mot solen og mottar direkte sollys. Solceller trenger ikke nødvendigvis direkte sollys for å fungere, men på overskyete dager vil de produsere noe mindre strøm enn på klare dager.

To vinkler som er avgjørende for solinnstrålingen som treffer en flate er helningsvinkelen til flaten fra horisontal og asimut-vinkelen, illustrert i Figur 2-12. Helningsvinkelen fra horisontalen varierer fra  $0^\circ$ , som er flatt/horisontalt, til  $90^\circ$  som er vertikalt. Hvor stor helningsgrad et panel bør ha for å få maksimalt med solstråling på seg, varierer ut fra hvor man befinner seg på kloden. Generelt vil man ha en høyere vinkel desto lenger unna ekvator man befinner seg. Asimut beskriver kompassretningen panelet peker. Generelt er det mot ekvator, som vil si sørover på den nordlige halvkule, og nordover på den sørlige halvkule. I Norge som er på den nordlige halvkule vil et panels om peker rett sør ha asimut  $0^\circ$ , rett vest ha asimut  $90^\circ$  og rett øst ha asimut  $-90^\circ$  (Hafez, Soliman, El-Metwally, & Ismail, 2017).



Figur 2-12: Helningsvinkelen og asimut til et solcellepanel (SolarDesignGuide, 2023)

## 2.2 Batteri

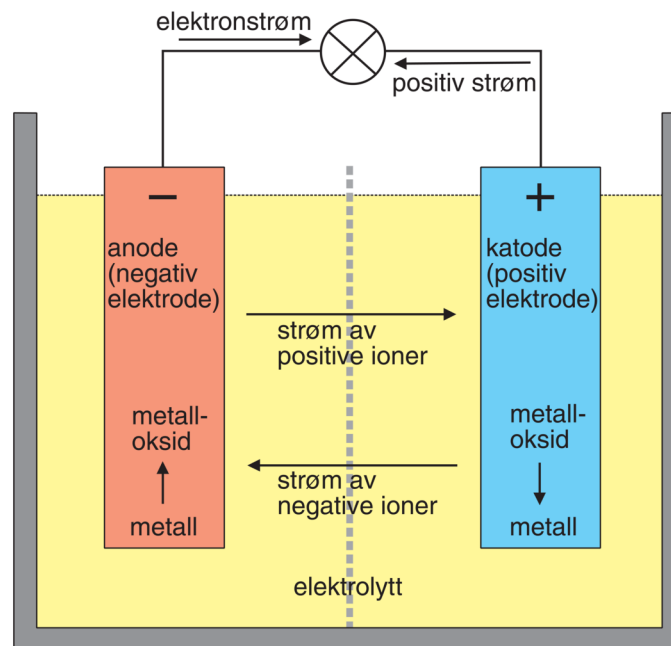
Fornybare energikilder byr på noen utfordringer, der en av de største er at de er intermittente. Det vil si at det ikke er en kontinuerlig energiproduksjon siden energien kommer fra ukontrollerbare naturressurser, som vind, sol og nedbør. Som vi vet produserer kun solceller energi når det er sollys, men det er ikke alltid slik at solen skinner når behovet for strøm er størst, altså at det ikke er sammenfall mellom forbruk og produksjon. I slike situasjoner vil det å kunne lagre energi være nyttig, da overskuddsenergi produsert på et tidligere tidspunkt vil kunne dekke energibehovet selv om det ikke genereres energi akkurat der og da. Det er flere måter å lagre energi på, som ved mekanisk, termisk, elektrisk og kjemisk energilagring (Rosvold & Hofstad, 2023).

### 2.2.1 Oppbygning og virkemåte

Batterier er den vanligste formen for kjemisk energilagring, og omformer kjemisk energi direkte til elektrisk energi ved behov. Et batteri består av tre hovedkomponenter, en negativ elektrode kalt anode, en positiv elektrode kalt katode og en elektrolytt. Disse danner til sammen en elektrokjemisk celle (Schmidt-Rohr, 2023). Videre skilles det mellom primær- og sekundærbatterier, der førstnevnte er ikke-oppladbare batterier, såkalte engangsbatterier. Sekundærbatterier er derimot oppladbare og kan brukes flere ganger (Gunvaldsen, Mathiesen, & Rosvold, 2023). Hvor lenge et batteri varer kommer an på hvor mye energi som er lagret i batteriet, og hvor mye energi lasten behøver. En last i en elektrisk krets er en komponent som krever elektrisitet for å virke.

Anoden og katoden er av ulike metaller eller kjemiske forbindelser og skilles av en elektrolytt, som vist i Figur 2-13. Anoden er laget av et stoff som vil oksidere, som betyr at det ønsker å gi fra seg et elektron, mens katoden er laget av et annet stoff som vil reduseres, altså ta imot elektroner (Schmidt-Rohr, 2018). Denne prosessen, eller reaksjonen, skjer på samme tidspunkt siden reduksjonsprosessen er avhengig av elektronene som blir produsert i oksidasjonsprosessen. Oksidasjonsprosessen ved anoden frigir elektroner fra metallet som flyter til den ytre krets til katoden, beskrevet i Figur 2-13 som elektronstrøm, og på veien utfører de et arbeid før de blir tatt opp i reduksjonsprosessen. Alle batterier har en begrenset mengde metall ved anoden, så når det meste har oksidert vil elektronstrømmen stoppe og batteriet er tomt. For primærbatterier er dette en enveisprosess, som betyr at den ikke er reversibel og elektrisk energi kan ikke omdannes tilbake til kjemisk energi. I

sekundærbatterier er prosessen reversibel, der man reverserer redoksreaksjonen (Gunvaldsen, Mathiesen, & Rosvold, 2023).

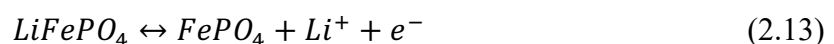


Figur 2-13: Virkemåte batteri (Gunvaldsen, Mathiesen, & Rosvold, 2023)

## 2.2.2 Litium-ion-batteri

Det finnes mange forskjellige typer batterier, der det mest kjente sekundærbatteri er litium-ion som man finner i for eksempel mobiltelefoner og elbilbatteri.

I et utladet litium-ion-batteri består anoden av en kobberfolie med grafitt på overflaten. Katoden består av en aluminiumsfolie med en litiumforbindelse på overflaten. Hva denne litiumforbindelsen består av varierer. Tidligere har kobolt vært mye brukt, men siden det er en begrenset naturressurs og er utrygt, ønsket næringen allerede for 20 år siden å se på andre litiumforbindelser som eksempelvis litiumjernfosfat (Ritchie & Howard, 2006) (Satyavani, Kumar, & Rao, 2016). Mellom anoden og katoden er det en tynn plastseparator, og anoden, katoden og separatorene er fylt med en flytende elektrolytt som inneholder litiumioner. Et litium-ion er et litiumatom som har avgitt ett elektron og dermed fått en positiv ladning. Når det lades drives elektroner fra katoden til anoden (Satyavani, Kumar, & Rao, 2016). Når elektronet separeres fra katoden, skjer følgende reaksjon



hvor

$LiFePO_4$  = litiumjernfosfat

$FePO_4$  = jernfosfat

$Li^+$  = litiumion

$e^-$  = elektron

$FePO_4$  blir værende på katoden, mens  $Li^+$  migrerer gjennom elektrolytten til anoden, der det gjenforenes med elektronet som har blitt drevet dit via laderen (Satyavani, Kumar, & Rao, 2016). Ved anoden skjer denne reaksjonen



hvor

$C_6$  = karbon

$LiC_6$  = litiumifisert grafitt

Batteriet er fulladet når denne syklusen er fullført for alle  $Li^+$ . Når batteriet benyttes skjer den omvendte reaksjonen, derav pilen som går begge veier i reaksjonsligningene (2.13) og (2.14). Batteriet er utladet når det igjen kun er litiumjernfosfat ved katoden (Satyavani, Kumar, & Rao, 2016).



## 2.3 Strømnettet

Strømnettet er en av de viktigste infrastrukturene i et hvilket som helst moderne samfunn, da nesten alle viktige samfunnsoppgaver og -funksjoner er kritisk avhengige av en velfungerende strømforsyning. De tre grunnleggende funksjonene i kraftforsyningen er produksjon, overføring og omsetning (Olje- og energidepartementet, 2023).

### 2.3.1 Dagens situasjon

Strømnettet er delt inn i tre nivåer (Olje- og energidepartementet, 2023):

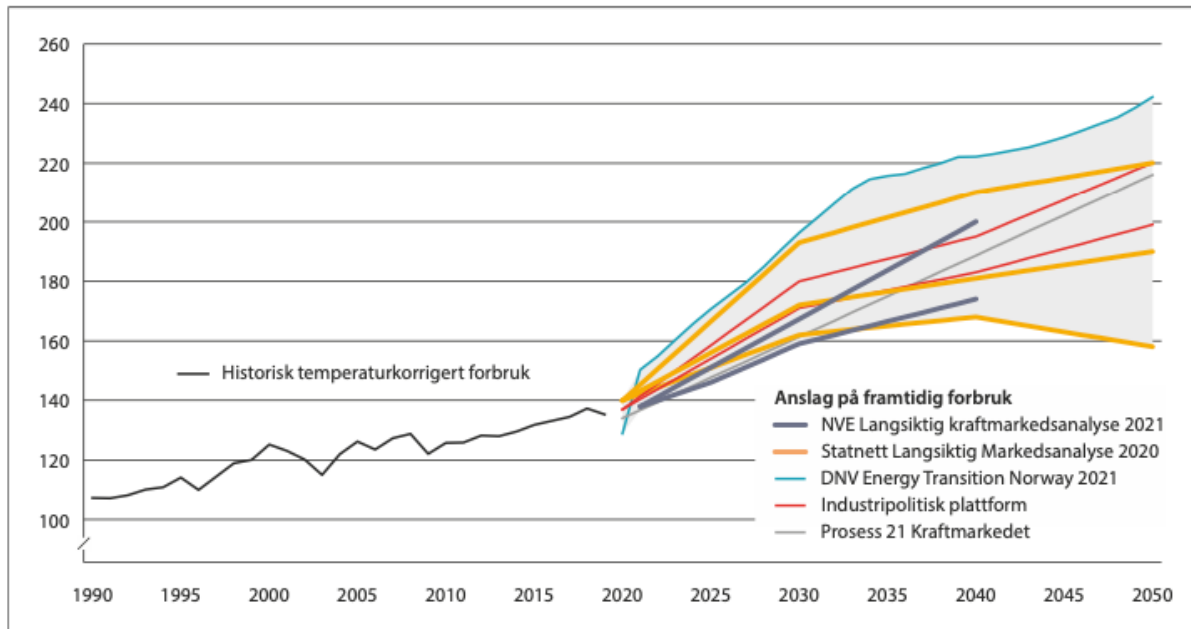
- **Transmisjonsnettet** er hovednettet for strømtransport i Norge, og binder sammen alle fylker i et landsdekkende system i tillegg til at det transporterer kraft over landegrensene. Det har et høyt spenningsnivå på 132, 300 eller 420 kV, og ca. 11 000 km.
- **Regionalnettet** binder ofte sammen transmisjonsnettet og distribusjonsnettet, og dekker større områder som regioner og fylker. Det har et spenningsnivå på 33, 66 eller 132 kV og utgjør ca. 19 000 km.
- **Distribusjonsnettet** er de lokale kraftnettene som forsyner sluttforbrukeren med strøm. Her skilles det mellom høyspent (spenningsnivå på 11 eller 22 kV) og lavspenning (spenningsnivå på 400 eller 230V) distribusjonsnett som til sammen utgjorde over 349 000 km i 2018 (NVE, 2019). Vanlige husholdninger får strøm fra lavspenningnettet på 230V, som er den spenningen man har i stikkontakten hjemme.

### 2.3.2 Fremtidige utfordringer

Det meste av strømnettet i Norge ble bygget mellom 1950 og 1990. Levetiden på disse kraftledningene er mellom 40 og 70 år, som betyr at vesentlige oppgraderinger er uunngåelig da strømnettet nærmer seg utløpsdato. I energiloven som kom i 1990 så står det blant annet at det lokale energiverket har leveringsplikt, som betyr at det nettselskapet som eier strømledningene, er pliktig til å levere elektrisk energi (Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon, 2022).

Som Figur 2-14 viser, forventes kraftforbruket i Norge å øke kraftig i fremtiden da samfunnet skal elektrifiseres i alle ledd, fra industrisektoren til transportsektoren. Med nettselskap som sitter på utdaterte nett og en kapasitet som allerede er på bristepunktet, er utbygging og kapasitetsøkning av strømnettet noe som må skje for at de skal kunne overholde leveringsplikten. Hvor mye kapasiteten til nettet må økes med er vanskelig å forutse, men det

er i stor grad avhengig av økningen i kraftbehov og effektbehovet, samt hvordan effektbehovet fordeles utover landet. Kapasiteten kan økes ved å for eksempel øke spenningen på kraftnettene, men det kan ikke gjøres uten å bygge nye nett (Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon, 2022).



Figur 2-14: Ulike aktørers anslag på kraftbehovet fremover (Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon, 2022)

Ved å produsere strøm nærmere forbrukerne, såkalt distribuert produksjon, kan behovet for nettutbygging være mindre. Grunnen er at redusert avstand mellom produsent og forbruker, krever færre lengder med kabel siden strømmen ikke må forflyttes like langt. I kapittel 2.3.3 vises det at en reduksjon i kabellengde også vil redusere tapet i kabelen. Behovet for nettutbygging reduseres hvis den distribuerte produksjonen skjer samtidig som forbruket. Det kan skje ved at enten produksjonen av kraft er regulerbar, eller at produksjonen kombineres med lagringsløsninger som batterier (Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon, 2022).

### 2.3.3 Tap av kraft

Tapet i strømmettet, også kjent som linjetap eller nettap, refererer til den mengden elektrisitet som går tapt under transporten i strømmettet fra produsent til forbruker. Deler av dette tapet er når strømmen blir omdannet til varme på grunn av motstand i kablene (Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon, 2022). Fra ligning (2.2) kan man se at effekten er proporsjonal med strømmen og spenningen. Ohms lov sier at

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A} \quad (2.15)$$

hvor

$R$  = resistans, elektrisk motstand

$\rho$  = resistivitet

$l$  = lengde

$A$  = arealet av tverrsnittet til kabelen

Skriver man om ligning (4.3) og setter den inn i ligning (2.2), får man

$$\Delta P = VI = RII = RI^2 = R \frac{P^2}{V^2} \quad (2.16)$$

hvor

$\Delta P$  = endring i effekt, effekttapet

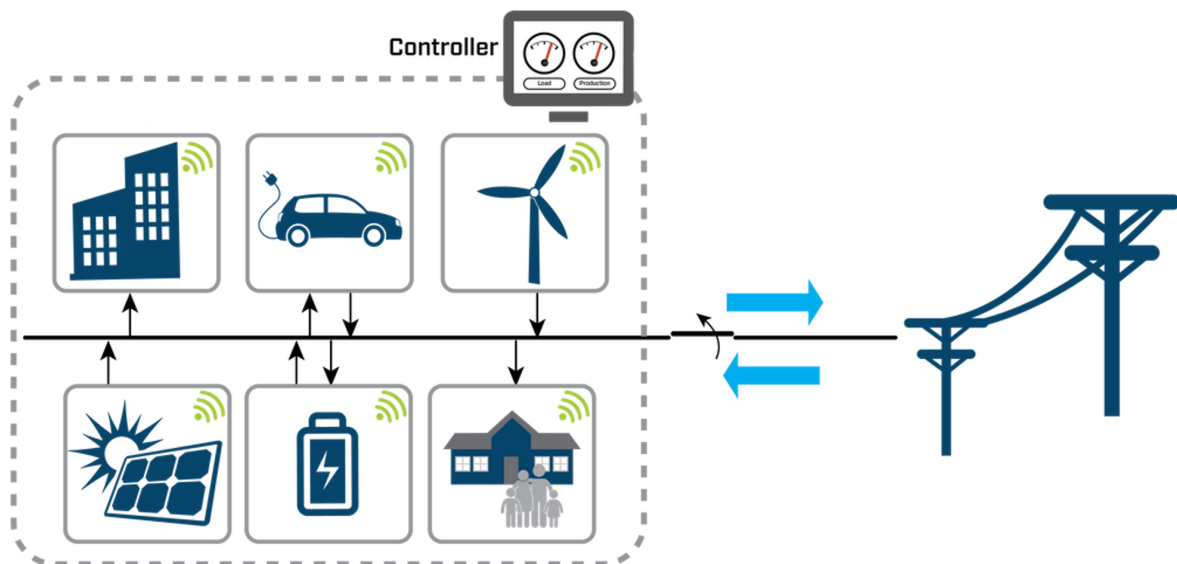
Ut fra ligning (4.3) kan man se at for en gitt effekt så kan tapet reduseres ved å gå opp i spenning eller areal på kabelen, om alt annet er konstant. Dette viser også at tapet vil øke med belastningen av strømmettet (Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon, 2022).

### 2.3.4 Mikronett

Et mikronett kan beskrives som en miniatyirutgave av kraftnettet. I et mikronett genereres, lagres, fordeles og forbrukes strømmen lokalt, over et begrenset geografisk område. Et slik område kan for eksempel være universitetscampus, sykehuskompleks, gårder eller nabolag. Karakteristisk for et mikronett er at man kan forsyne de som er koblet på det med lokalprodusert eller lagret kraft, uten strøm fra det overliggende strømmettet (Lillebo, 2023). Den lokalproduserte kraften kommer fra fornybare energikilder som er plassert nært der strømmen forbrukes. Slik lokalprodusert kraft kan være solcellepanel på taket til bygningene som er koblet på mikronettet, vindmøller på jordet, eller et minikraftverk i bekken som renner forbi gården. Strømmen generes lokalt, blir lagret lokalt i batterier, og distribueres blant bygningene og de andre lastene som er koblet på mikronettet. En stor fordel med lokalprodusert strøm er at tap i kabler reduseres da strømmen ikke må reise lange strekninger

fra produsent til forbruker, som vist i ligning (4.3). Der kan man se at om kabellengden økes mens alt annet er konstant, vil man få en høyere motstand i kabelen.

Det skilles mellom to typer mikronett, de som er tilkoblet kraftsystemet (tilkoblet mikronett), og de som ikke er det (isolert mikronett). Figur 2-15 illustrerer et tilkoblet mikronett, der det kan kobles av og på ved behov via en hovedbryter, men det driftes normalt sett som en forlengelse av kraftnettet. Fordelen med tilkoblede mikronett er at hvis man skulle få et strømbrudd på kraftnettet, vil det kunne slå over bryteren og drifte seg selv, i såkalt øydrift. Tilkoblede mikronett er som regel ikke dimensjonert til å kunne være i øydrift over en lengre periode, men har tilstrekkelig med energiproduksjon og lagring til å kunne drifte kritiske laster i en gitt tidsperiode. Hvor lenge er vurderinger som må gjøres fra mikronett til mikronett, der man må se på den økonomiske lønnsomheten ved dimensjoneringen.



Figur 2-15: Illustrasjon av et mikronett (CINELDI, 2023)

Om det ikke er koblet til kraftnettet drives det i øydrift, og det er her den store forskjellen mellom tilkoblede og isolerte mikronett kommer inn. Tilkoblede kan velge å drives i øydrift, mens isolerte kun drives i øydrift.

For å være sikre på at forbruket til enhver tid ikke overstiger tilgjengelig strøm, må mikronettet ha et styresystem som konstant overvåker balansen mellom produksjonen, forbruket og lagringen i mikronettet. I et tilkoblet mikronett vil styresystemet i tillegg sørge for at overgangen fra nettdrift til øydrift skjer på en trygg og sikker måte så man unngår forstyrrelser på strømmettet som spenningskvalitetsproblemer (Lillebo, 2023).

#### **2.3.4.1 Solcellesystem og batterilagring**

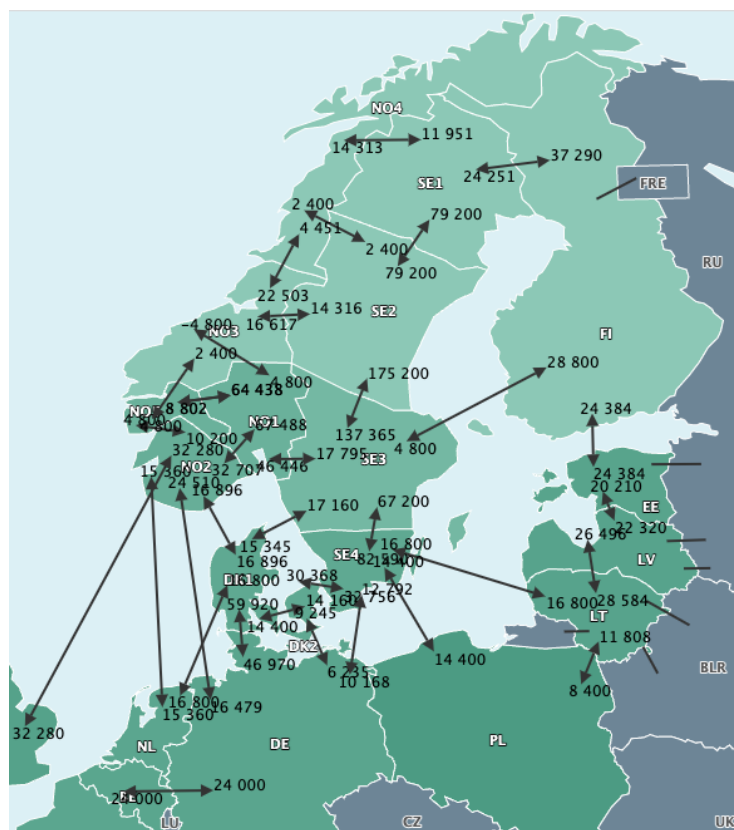
Når et solcellesystem skal kobles på et mikronett, som enten opererer i øydrift eller tilkoblet drift, er det viktig å ta hensyn til variasjoner dette kan påføre nettet. Er det mange solceller som generer kraft samtidig, men det er et lavt forbruk av strøm så den genererte kraften ikke blir benyttet, kan nettet få problemer grunnet mangel på overføringskapasitet som kan ødelegge nettet. En annen faktor er at spenningskvaliteten, da spenningen i nettet vil stige når solcelleprodusert strøm føres på linjene, som kan føre til økt spenning hos sluttforbrukeren (Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon, 2022).

Flere av utfordringene nevnt over kan løses ved å inkludere et energilager i nettet. Dette fører til at strømmen lagres til det er behov for den, og dermed unngå strømmettet i sin helhet (Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon, 2022).

## 2.4 Strømpris

Over 98% av strømmen som er produsert i Norge kommer fra fornybare energikilder. For et normalår er kraftproduksjonen på ca. 156 TWh, der 136,7 TWh er fra vannkraft, 16,9 TWh fra vindkraft og 2,5 TWh fra termisk kraft (NVE, 2023).

Prisen på strømmen er avhengig av flere elementer. Siden strømmen som produseres i Norge kommer av fornybare energikilder, vil prisen bevege seg i takt med været og klimaet. Ved tørre perioder vil for eksempel fyllingsgraden i vannmagasinene synke, og prisen vil gå opp. En annen faktor er strømprisen i Europa. Norge er koblet sammen med våre naboland gjennom kraftkabler, der Norge både eksporterer og importerer strøm som vist i Figur 2-16. Dette fører til at om det er lite vind i Tyskland, så øker strømprisen i Norge. De siste årene har det vært nedstengning av europeiske kjerne- og kullkraftverk, som igjen fører til mindre produksjon og høyere strømpriser. I tillegg har prisen på kull og gass økt, som gjør det dyrere å drive denne typen kraftverk og dermed går strømprisen opp.



Figur 2-16: Overføringskapasiteten for 1. juni 2023 mellom ulike strømsoner (Nord Pool Group, 2023)

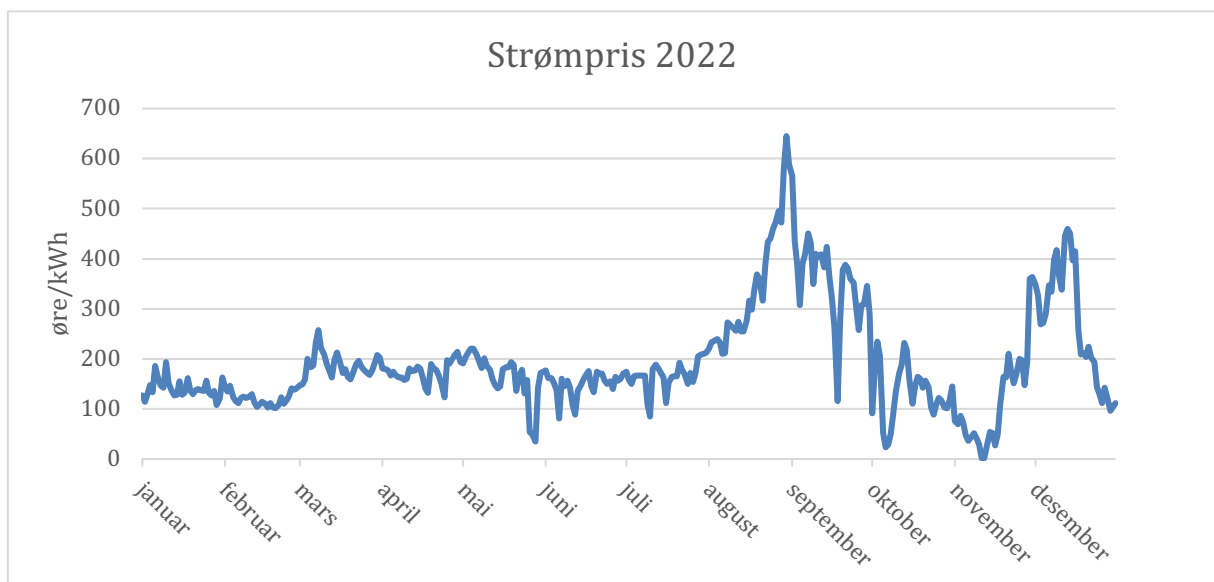
Strømprisen består av flere deler; spotpris som er markedsprisen for selve strømmen, nettleie, avgifter og MVA. På Røros er det nettselskapet Røros E-verk Nett as som setter nettleien, da

det er de som eier strømmettet. For næringskunder med forbruk på over 100 000 kWh/år var nettleieprisen som vist i Figur 2-17.

<b>Energiledd:</b>	<b>Eksl MVA</b>	
Energiledd dag ( kl 06.00 - kl 22.00 )	21	øre/kWh
Reduksjon energiledd Natt ( kl 22.00 - kl 06.00 )	-6	øre/kWh
<b>Offentlige avgifter</b>	<b>Eksl MVA</b>	
Forbruksavgift**	15,41	øre/kWh
Avgift Energifondet (Næring)	800	kr/år
<b>Faste ledd</b>	<b>Eksl MVA</b>	
Årlig fastbeløp	15400	kr/år
<b>Effektpris pr mnd ref makstimen</b>	<b>Eksl MVA</b>	
0 - 100 kW	51	kr/kW
101 - 200 kW	47	kr/kW
201 - 500 kW	43	kr/kW
over 500 kW	33	kr/kW

Figur 2-17: Detaljert beskrivelse av nettleiens oppbygning for næringskunder med forbruk over 100 000 kWh/år i 2022 (Røros E-verk Nett as, 2023)

Figur 2-18 viser spotprisen for prisområdet Røros er i, som er NO1 på Figur 2-16. Grafen viser at det er store variasjoner gjennom året, der strømmen er nesten gratis i noen perioder, og over 600 øre/kWh i andre. Det som ikke vises på denne skalaen er variasjon intradag, som også kan være veldig stor.



Figur 2-18: Gjennomsnittlig spotpris på Røros for hver dag i 2022 (Nord Pool Group, 2023)

Grunnet de høye strømprisene innførte regjeringen strømstøtte for både privatpersoner og til landbruket. Denne har variert fra måned til måned og er kun en midlertidig ordning som ligger utenfor rammene til denne oppgaven.

## 3 Metode

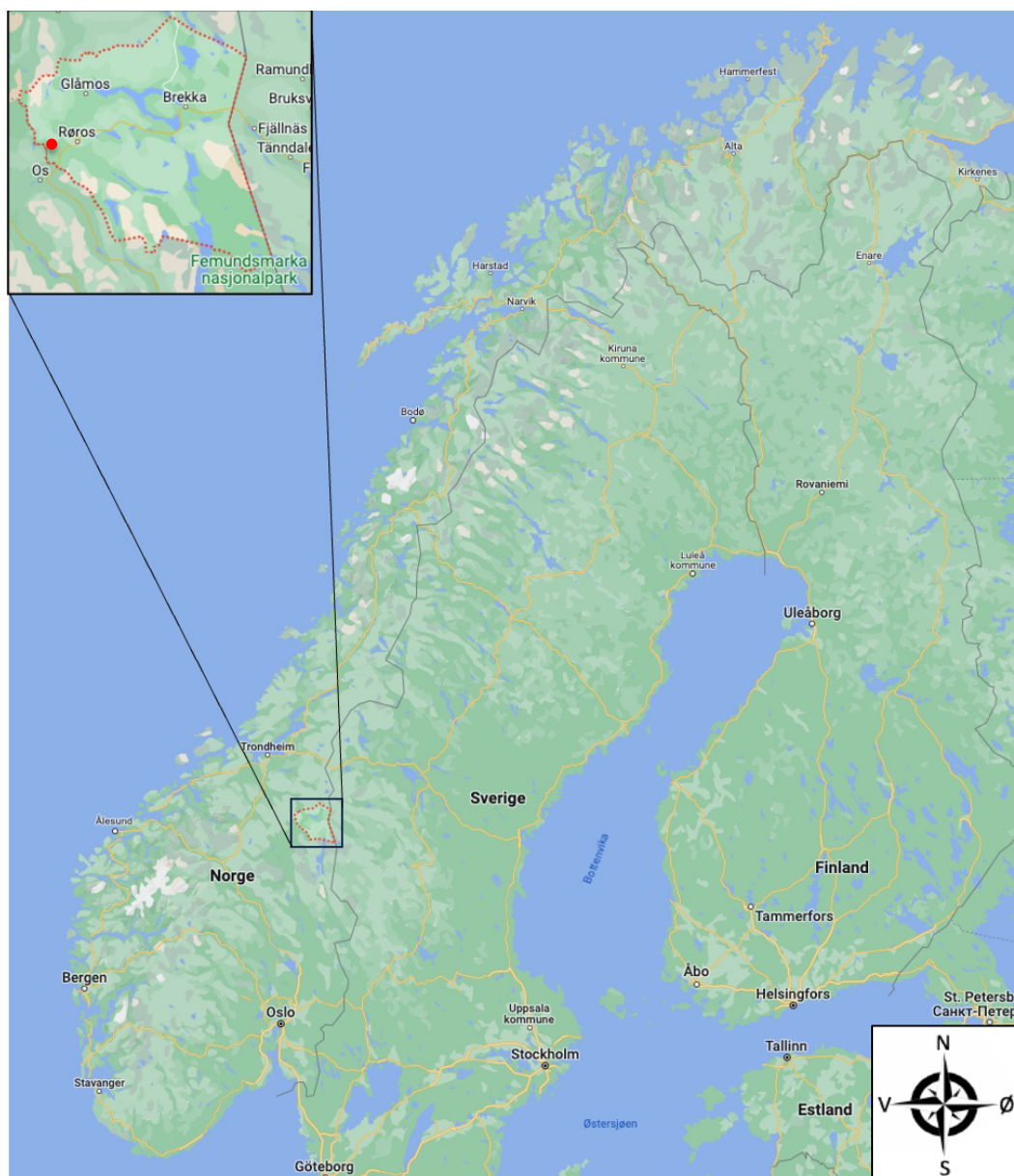
Den essensielle delen av oppgaven gikk ut på å beregne hvor mye strøm fra solenergi som kunne produseres, for så å se på hvor mye av strømforbruket som kunne dekkes av dette og hvor stor kapasitet et batteri måtte ha for å kunne drive mikronettet over en periode uten strømproduksjon fra solcellepanelene. Rådata som solinnstråling for området ble hentet inn fra satellittbaserte solinnstrålingsdatabaser, men selve energiproduksjonen og variasjoner av det ble beregnet i Excel. Det fører til at mulighetene for menneskelige feil er større, sammenlignet med simuleringsprogram som beregner alt. Samtidig gir en manuell beregning større mulighet til å forstå hvilken betydning alle faktorene som trengs for å estimere et slikt solenergisystem, har og hva endringer blant disse kan gjøre med resultatet.

### 3.1 Lokasjon

Bergstaden Røros ligger på over 600 meter over havet i Røros Kommune, helt sør-øst i Trøndelag fylke på grensen til Sverige som man kan se i Figur 3-1. Røros har et subarktisk klima, med lange og kalde vintre der temperaturen kan komme helt ned i  $-45^{\circ}\text{C}$ , og lengre perioder med  $-30^{\circ}\text{C}$  ikke er uvanlig. Somrene er og korte, men til dels varme somre med temperaturer på vanligvis rundt  $10-15^{\circ}\text{C}$ , men også dager med temperaturer oppunder  $30^{\circ}\text{C}$ . Årlig middeltemperatur er på  $1,1^{\circ}\text{C}$ , og nedbørsmengden er på rundt 550 mm for et normalår, som tilsier et tørt klima (Norsk klimaservicesenter, 2023).

I prosjektoppgaven til denne masteroppgaven var det to gårder som var omtalt, der en av dem var Galåvolden Gård og Galåen Samdrift. Det var derfor naturlig å fortsette med disse områdene og legge mikronettet omkring her. Galåvolden Gård og Galåen Samdrift ligger vest i Røros Kommune, markert med en rød prikk i Figur 3-1.





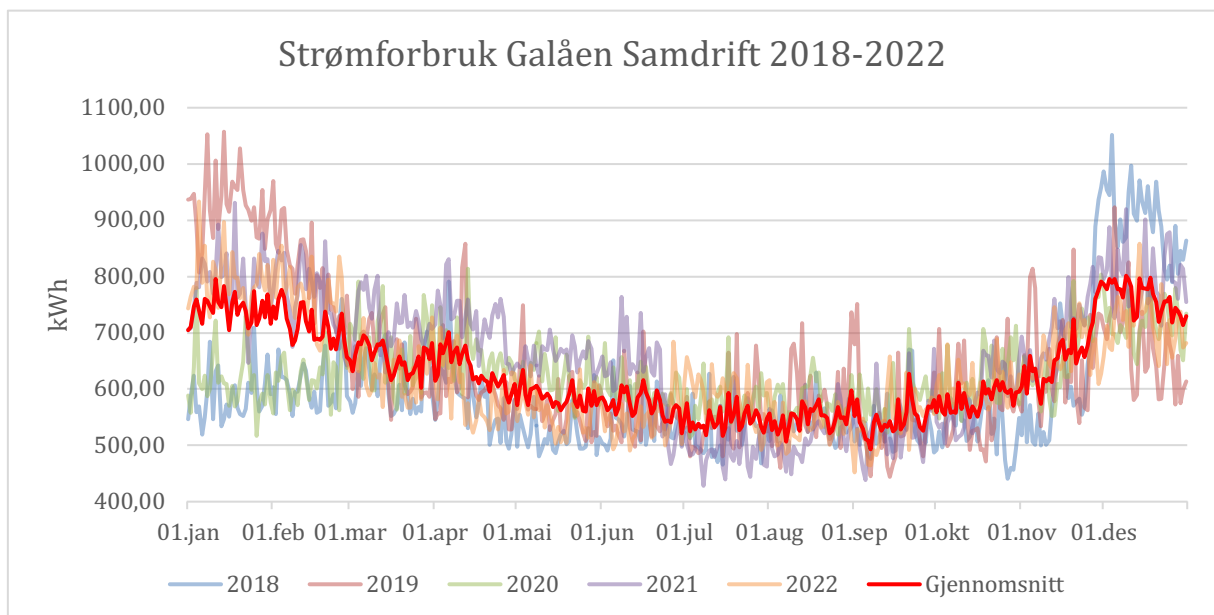
Figur 3-1: Røros kommune i forhold resten av Norge (Skjermdump: Google Maps)

Figur 3-3 viser Galåvolden Gård og Galåen Samdrift i midten, samt et skravert område med en radius på 500 meter omkring disse. Innenfor denne radiusen er de fiktive boligene, Hytte 1-5 og Hus 1, lokalisert. Hytte 1-5, Hus 1, Galåvolden Gård og Galåen Samdrift er de boligene som er inkludert i mikronettet. Som Tabell 3-1 viser er det veldig liten variasjon i årlig solinnstråling innenfor denne radiusen av Galåvolden Gård og Galåen Samdrift. I tillegg er det ved Galåvolden Gård og Galåen Samdrift de største takflatene er, som vist i Tabell 3-2. Det vil si at siden Hytte 1-5 og Hus 1 ikke har en fysisk lokasjon innenfor det skraverte området, vil alle beregninger videre i oppgaven bli gjort med utgangspunkt i den årlige solinnstrålingen ved Galåvolden Gård og Galåen Samdrift.

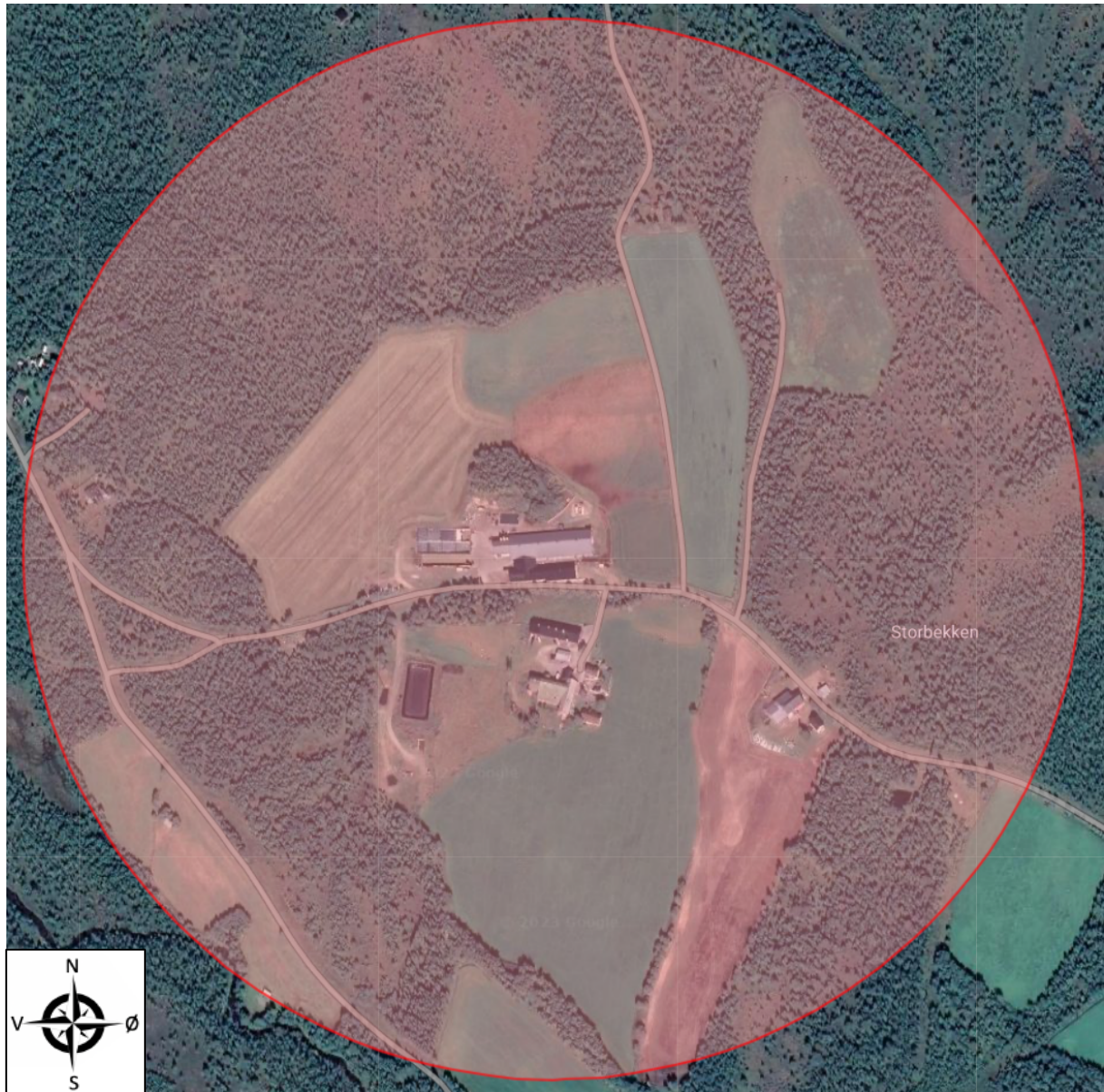
Tabell 3-1: Variasjon i årlig solinnstråling innenfor mikronettet

Lokasjon	Koordinater [°]	Årlig innstråling ved 22° helningsvinkel $\left[\frac{kWh}{m^2}\right]$
Galåvolden Gård og Galåen Samdrift	62.563, 11.270	890,24
500 meter nord	62.567, 11.270	890,27
500 meter vest	62.563, 11.260	890,21
500 meter sør	62.563, 11.270	889,99
500 meter øst	62.563, 11.280	890,24

Strømforbruket kan variere veldig fra år til år, som Figur 3-2 viser. I figuren er strømforbruket til Galåen Samdrift fra 2018 til 2023 fremstilt, med en gjennomsnittslinje for hver dag over disse årene. Grafen viser tydelig sesongvariasjonen, og at det er størst strømforbruk på vinteren. Grunnen til det er i stor grad at det er mer strøm som går til oppvarming sammenlignet med sommeren, og man kan se at vinteren 2018/2019 var spesielt kald. Det er også på vinterstid de største variasjonene fra år til år er, mens forbruket på sommeren holder seg mer stabilt.



Figur 3-2: Galåen Samdrift sitt strømforbruk fra 2018 til 2022, samt gjennomsnittet for alle årene



Figur 3-3: Område med radius på 500 meter rundt Galåvolden Gård og Galåen Samdrift (Skjermdump: Norgeskart)

Figur 3-4 viser Galåvolden Gård og Galåen Samdrift, der de egnede takene for installasjon av solcellepanel er merket med bokstavene A – G. Takene markert A – D tilhører Galåen Samdrift, og takene E – G tilhører Galåvolden Gård.



Figur 3-4: Egnede takområder for installasjon av solcellepanel på Galåvolden Gård og Galåen Samdrift (Skjermdump: Norgeskart)

For å kunne regne ut hvor mye strøm solcellene ville produsert, er det noen viktige variabler man først må vite. Ett av dem er hvor mange kvadratmeter takareal som er tilgjengelig for å kunne beregne hvor mange solcellepanel man kan installere.

I forbindelse med denne oppgaven fikk jeg vite strømforbruket i 2022 og grunnflaten til fem hytter og ett hus av Ren Røros. Disse hyttene blir kalt Hytte 1 – 5 og Hus 1 i denne oppgaven.

Siden Ren Røros ikke kan gi opplysninger om hvem sitt strømforbruk det er, kunne de ikke dele dimensjonene på boligene. Det betyr at for å finne antall solceller som teoretisk kan installeres på boligene, må man gjøre antagelser. Jeg antok at boligene var rektangulære, der forholdet mellom lengde og bredde på var  $11,5/9$ . For så å finne takareal må man ta hensyn til takvinkelen, da det utgjør noen kvadratmeter ekstra sammenlignet med arealet til grunnflaten til huset. Som nevnt i 3.2.2 blir denne satt til  $22^\circ$  i denne oppgaven, og takarealet kan estimeres.

I tillegg til Hytte 1 – 5 og Hus 1, var Galåvolden Gård og Galåen Samdrift villige til å dele deres strømforbruk for 2022. Dimensjonene til bygningene med egnet takareal for installasjon av solcellepanel på Galåvolden Gård og Galåen Samdrift kan måles opp via satellittbilder, og ved  $22^\circ$  takvinkel kan takarealet beregnes. Nyttbart estimert takareal for Hytte 1 – 5, Hus 1 og takene til Galåvolden Gård og Galåen Samdrift er vist i Tabell 3-2. Tabellen viser også strømforbruket de hadde i 2022, samt hvor mange solcellepanel takene kan dekket med gitt dimensjonene på panelene som vist i. Det er disse solcellepanelene som vil bli brukt i denne oppgaven med mindre annet er spesifisert.

Selv om Tabell 3-2 viser at nyttbart takareal er  $2786 \text{ m}^2$ , kan ikke solcellepanel legges på hele det tilgjengelige arealet i praksis, da man må ta hensyn til utformingen til solcellepanelene. Ved å se på dimensjonene til panelene i Figur 3-5 og sammenligne det med dimensjonene til hvert enkelt tak, vil man få fordelingen av solcellepanel som vist i Tabell 3-2. Figur 3-5 viser at hvert solcellepanel har et areal på underkant av  $1,77 \text{ m}^2$ , som vil si at i praksis er nyttbart takareal  $2528 \text{ m}^2$ .

Tabell 3-2: Tak som kan dekkes med solcellepanel, antall solcellepanel og strømforbruk

Lokasjon		Nyttbart takareal [m <sup>2</sup> ]	Antall solcellepanel	Strømforbruk [kWh]
Hytte 1		79	36	17 595,61
Hytte 2		71	32	3 785,03
Hytte 3		112	50	16 570,7
Hytte 4		47	21	1 887,72
Hytte 5		41	18	4 641,74
Hus 1		58	28	14 743,13
Galåen Samdrift	Tak A	105	48	228 820,96
	Tak B	1052	552	
	Tak C	214	114	
	Tak D	250	136	
Galåvolden Gård	Tak E	355	189	268 530,07
	Tak F	242	126	
	Tak G	161	78	
<i>Totalt</i>		<i>2786</i>	<i>1428</i>	<i>556 574,96</i>

Solcellepanelet som er beskrevet i Figur 3-5 er et panel bestående av 104 monokrystallinske enkeltovergangsceller. Denne solcellepanel-serien, SunPower Maxeon 3, er den serien en av Norges største solcelleutbyggere Otovo, har som sin premium versjon de tilbyr sine kunder (Bentzen, 2023). Prisen på ett slikt panel er omtrent 4 800 kroner (Solcellespesialisten AS, 2023). Videre i denne oppgaven er det dette, merket med rødt i Figur 3-5, som vil bli brukt.

Electrical Data			
	SPR-MAX3-400	SPR-MAX3-395	SPR-MAX3-390
Nominal Power (P <sub>nom</sub> ) <sup>9</sup>	400 W	395 W	390 W
Power Tolerance	+5/0%	+5/0%	+5/0%
Panel Efficiency	22.6%	22.3%	22.1%
Rated Voltage (V <sub>mpp</sub> )	65.8 V	65.1 V	64.5 V
Rated Current (I <sub>mpp</sub> )	6.08 A	6.07 A	6.05 A
Open-Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> ) (+/-3%)	75.6 V	75.4 V	75.3 V
Short-Circuit Current (I <sub>sc</sub> ) (+/-3%)	6.58 A	6.56 A	6.55 A
Max. System Voltage		1000 V IEC	
Maximum Series Fuse		20 A	
Power Temp Coef.		-0.27% / °C	
Voltage Temp Coef.		-0.236% / °C	
Current Temp Coef.		0.058% / °C	

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40°C to +85°C
Impact Resistance	25 mm diameter hail at 23 m/s
Solar Cells	104 Monocrystalline Moxeon Gen III
Tempered Glass	High-transmission tempered anti-reflective
Junction Box	IP-68, Stäubli (MC4), 3 bypass diodes
Weight	19 kg
Max. Load <sup>11</sup>	Wind: 2400 Pa, 244 kg/m <sup>2</sup> front & back Snow: 5400 Pa, 550 kg/m <sup>2</sup> front
Frame	Class 1 black anodized (highest AAMA rating)

Tests And Certifications	
Standard Tests <sup>10</sup>	IEC 61215, IEC 61730
Quality Management Certs	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
Ammonia Test	IEC 62716
Desert Test	IEC 60068-2-68, MIL-STD-810G
Salt Spray Test	IEC 61701 (maximum severity)
PID Test	1000 V: IEC 62804, PVEL 600 hr duration
Available Listings	TUV

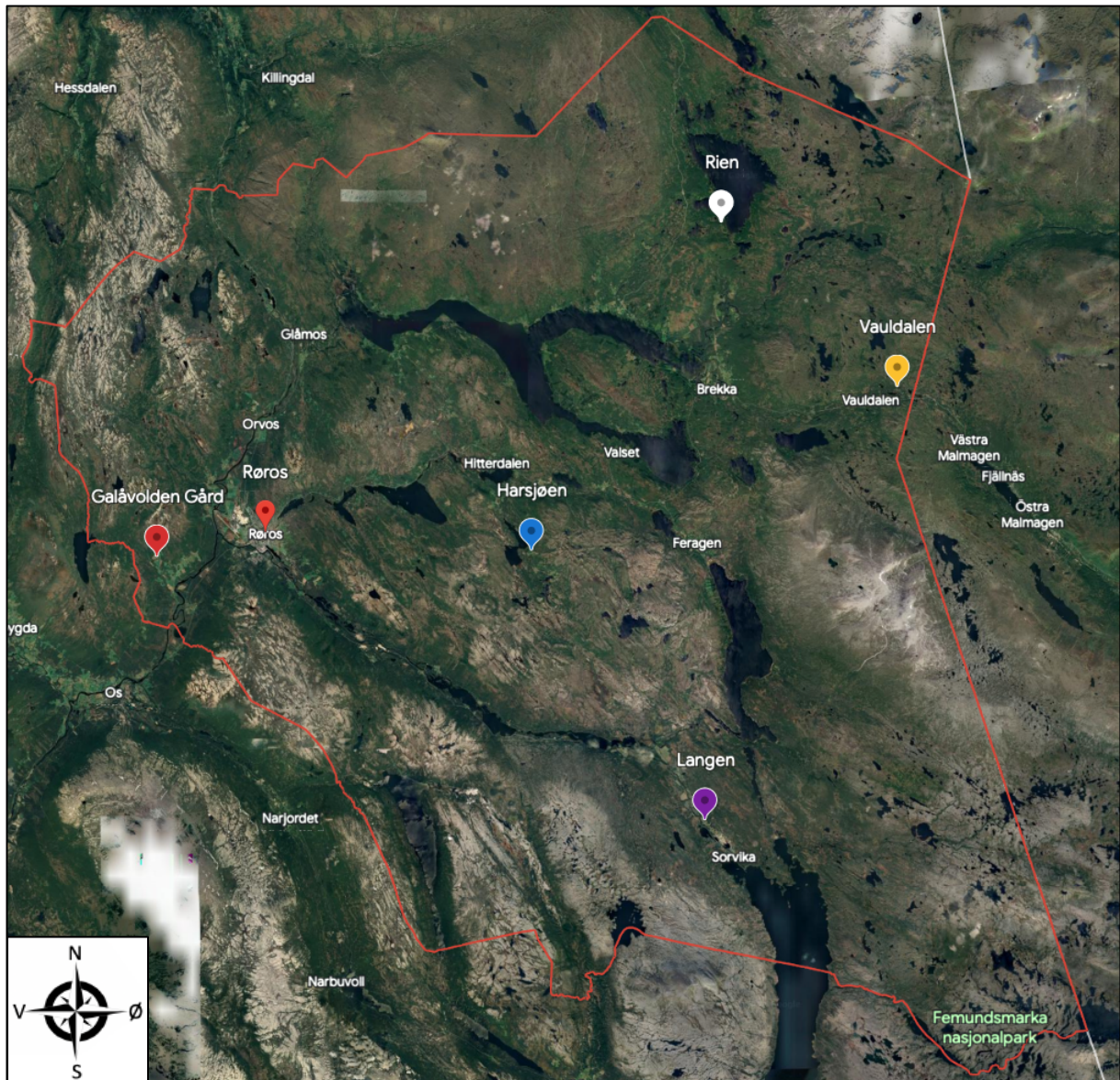
  

Figur 3-5: Utklipp av produktdatablad for SunPower Moxeon 3 solcellepanel (SunPower Moxeon, 2020)

For å se hvor stor lokal variasjon det var på gjennomsnittlig årlig solinnstråling per kvadratmeter på en vinklet flate, ble fire lokasjoner som var spredt rundt om i Røros kommune valgt. De lokale variasjonene blant disse, i tillegg til Galåvolden Gård og Galåen Samdrift, ser man i Tabell 3-3. Tabellen viser at det er en forskjell i innstrålingen basert på hvor man befinner seg i kommunen, der samtlige har en høyere årlig innstråling enn ved Galåvolden Gård og Galåen Samdrift.

Tabell 3-3: Lokal variasjon i solinnstråling i Røros Kommune

Lokasjon	Koordinater [°]	Årlig innstråling ved 22° helningsvinkel $\left[\frac{kWh}{m^2}\right]$
Galåvolden Gård og Galåen Samdrift	62.563, 11.270	890,24
Langen	62.434, 11.852	930,69
Rien	62.727, 11.871	907,84
Vauldalen	62.646, 12.058	899,72
Harsjøen	62.568, 11.661	908,86



Figur 3-6: Forskjellige lokasjoner i Røros kommune (Skjermdump: Google Earth)

## 3.2 Estimeringsverktøy

For å gjøre de mest nøyaktige estimeringene for solenergiproduksjon, er det essensielt å benytte seg av det beste programmet til å gjøre det. Det er flere viktige faktorer, som at programmet benytter pålitelige solstrålingsdata og omfattende klimatologiske parametere for området som skal undersøkes. Verktøyet bør også ta hensyn til lokale forhold og variabler, samt være brukervennlig. Det er også viktig at det tilbyr tilpasningsmuligheter for å spisse det mot hver enkelt sak. Som presentert i kapittel 2.1.2.3 er det store variasjoner i virkningsgraden til de forskjellige type solcellene, og å kunne velge solcelleteknologi er en viktig faktor for energiproduksjonen. Andre viktige faktorer er å kunne tilpasse



helningsvinkelen og orienteringen til panelene, i tillegg til å kunne justere for variabler som temperatur.

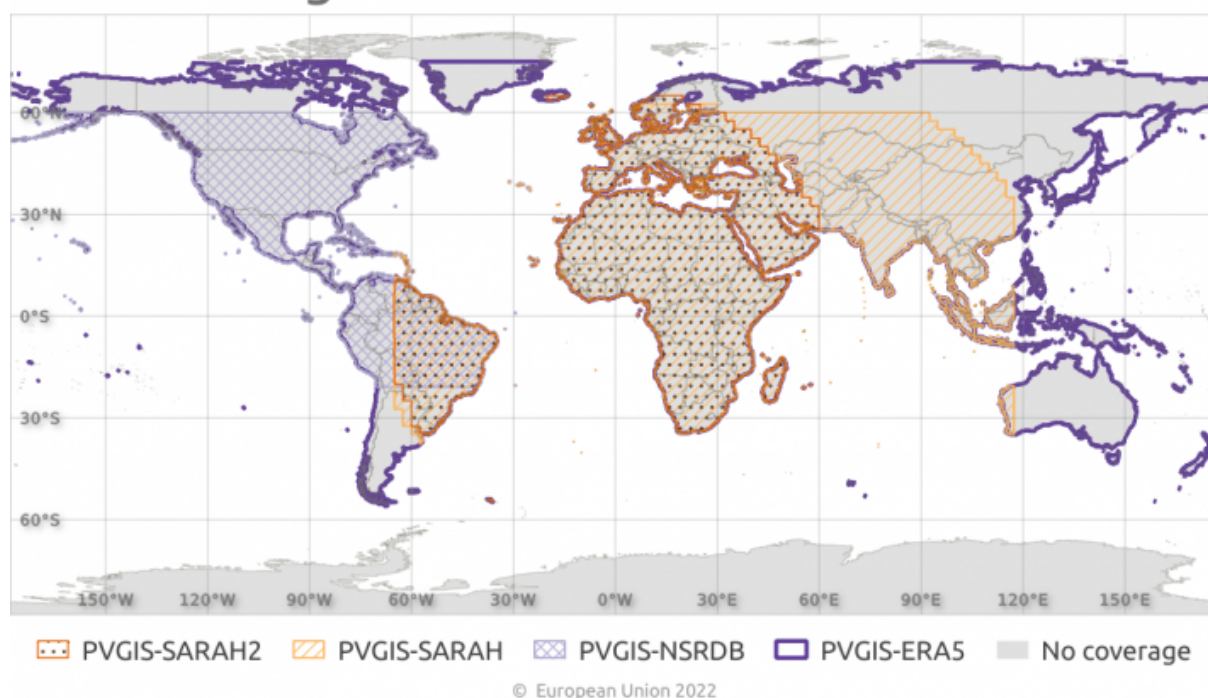
I denne sammenheng har programmet Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) utviklet av Europakommisjonens Joint Research Centre, vist seg å være et av de beste estimeringsverktøyene, med små variasjoner fra reelle data (Psomopoulos, 2015). Det er viktig å merke seg at PVGIS er et estimeringsverktøy, og er ikke et kalkuleringsverktøy eller vitenskapelig simulator.

### **3.2.1 PVGIS**

I PVGIS er det flere variabler å velge mellom, der en av de viktigste er solinnstrålingsdatabaser. Som illustrert i Figur 3-7 viser dekker to av disse deler av Norge. Røros-regionen dekkes av begge solinnstrålingsdatabasene, SARA2 (Solar And Radiation Archive) og ERA5 (ECMWF Reanalysis 5). SARA2 er en database basert på data fra satellittmålinger av solstrålingsdata ved overflaten, og har en oppløsning på  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ , som er rundt 5 km. I en artikkel fra 2022 som undersøkte hvilke strålingsdata som var best for å modellere solenergiproduksjon i Tyskland, var SARA2 å foretrekke blant et utvalg av syv databaser, der ERA5 var en av dem (Kenny & Fiedler, 2022). ERA5 er en reanalysedatabase basert på ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), og har en oppløsning på  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , som er ca. 30 km. ECMWF produserer værprognoser og klimaanalyser, som er reanalysert til å kunne benyttes til solstrålingsdatabaser i ERA5. Ifølge en artikkel publisert i 2018 som sammenlignet et eksisterende solenergisystem i Polen med estimeringer basert på forskjellige databaser, hadde ERA5 det minst nøyaktige resultatet for energiproduksjon blant de som ble undersøkt (Cieslak & Dragan, 2018).

Med bakgrunn i dette vil det være innstrålingsdata fra SARA2 som vil bli brukt videre i oppgaven.

## Coverage of Solar Radiation Databases

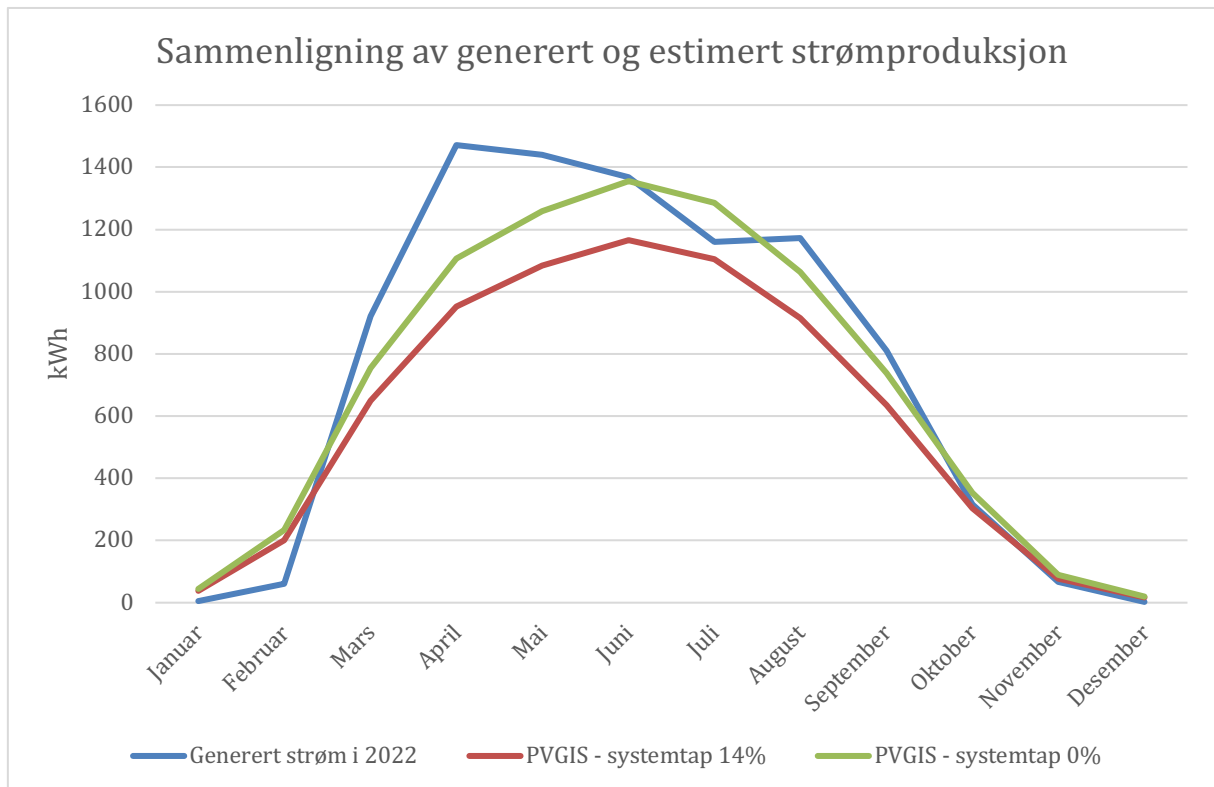


Figur 3-7: Solinnstrålingsdatabaser (European Union, 2023)

PVGIS har noen unøyaktigheter (Psomopoulos, 2015), og for å få de beste estimatene vil det være en fordel å kalibrere PVGIS. Det er ikke så mange variabler å gjøre dette med, men en av dem er det PVGIS kaller systemtap (engelsk: system loss), altså en prosentandel som skal tilsvare alle tap som forekommer i systemet. I PVGIS er dette blant annet tap i kabler, temperaturtap, tap i vekselrettere, skitt og snø på solcellepanelene. I tillegg vil solcellenes evne til å generere strøm bli litt dårligere over årene, og dette er også kalkulert inn i denne prosentandelen (European Commission, 2023).

For å kunne finne den prosentandelen for systemtap som er nærmest virkeligheten, trenger man reelle data som sammenlignes med data fra PVGIS. Det er installert et solcelleanlegg på taket til fjøset Galåen Samdrift, som dekker deler av området markert med Tak D i Figur 3-4. Denne installasjonen er på 10,27 kWp, med en helningsvinkel på 22°, asimut 0° og det er solcellepanelene i Figur 3-5 som er installert, som er en av grunnene til at det er disse panelene som brukes til andre beregninger i denne oppgaven. I 2022 genererte det 8794,46 kWh. Legger man dette anlegget inn i PVGIS med deres foreslåtte systemtap på 14%, vil man få en simulert årlig produksjon på 7141,89 kWh, som er 18,8% mindre enn den faktiske produksjonen. Om den årlige variasjonen på 498,32 kWh som PVGIS oppgir legges til, er det fremdeles 13,2% under faktisk produksjon. Det betyr at for å få tall som er nærmere virkelige

tall på estimeringer senere i oppgaven, er man nødt til å endre systemtapet. Som Figur 3-8 viser vil et systemtap på 0% gi en bedre simulering av strømproduksjonen fra solcellene, mot virkelige målinger. Ved 0% systemtap er den estimerte strømproduksjonen 8304,53 kWh, som er 5,6% under den faktiske produksjonen, men det kan virke som en buffer for årlig variasjon.



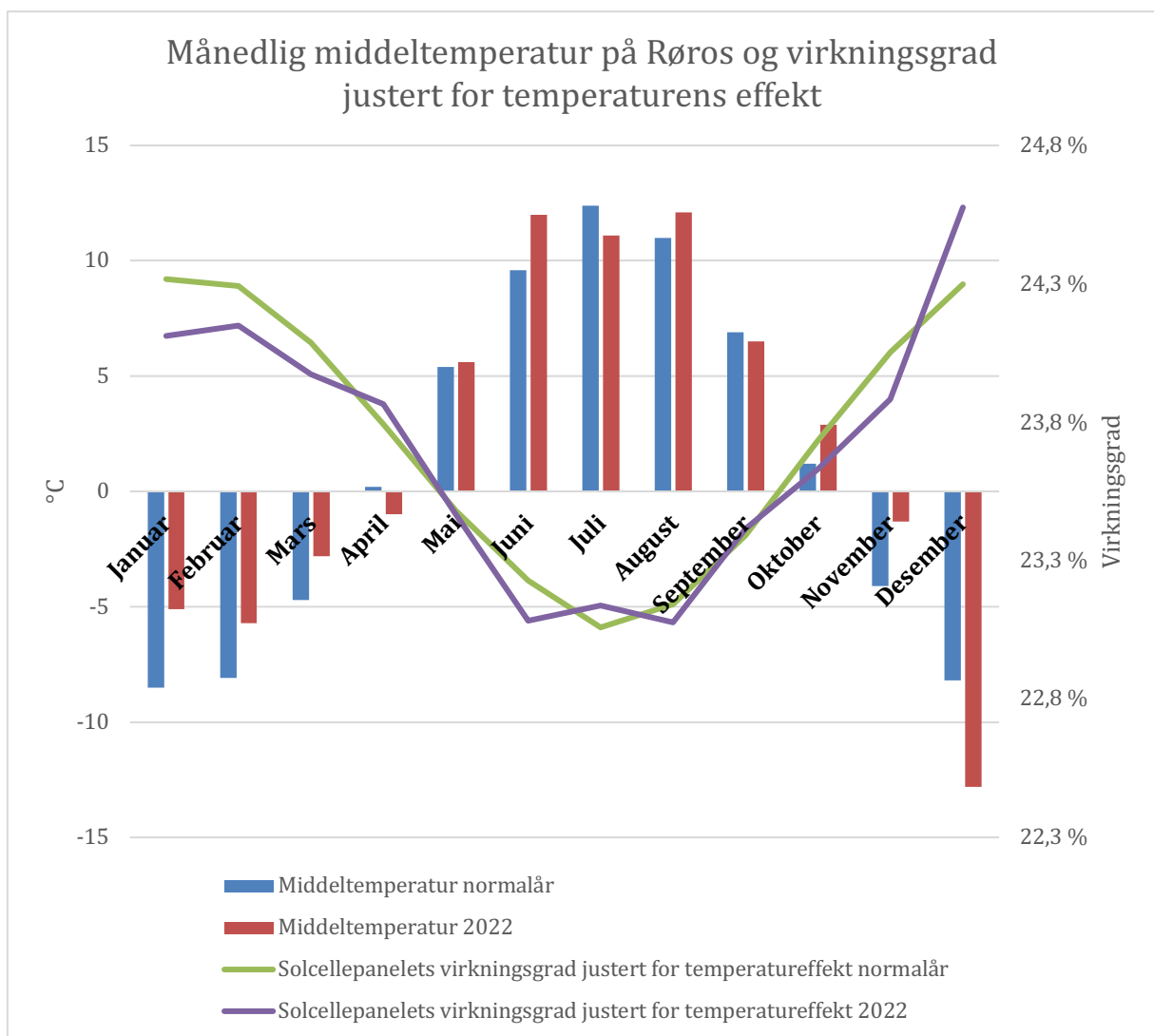
Figur 3-8: Sammenligning av faktisk generert strøm i 2022 og estimer gjort av PVGIS

Ved å sammenligne Figur 3-8 og Figur 3-9 vil man se at i et normalår ville strømproduksjonen vært 0 kWh i januar, februar og desember, da solcellepanelene er dekket av snø og dermed ikke kunne generert strøm. Derfor vil strømproduksjonen for månedene januar, februar og desember videre i denne oppgaven også være 0 kWh.

Jeg tror at den viktigste faktoren for at PVGIS simulerer for lavt, er at den regner med en lavere virkningsgrad for solcellene. Det inkluderer for eksempel ingen innstrålingsdata etter 2020, som kan tyde på at noe av informasjonen PVGIS bruker er utdatert. Det står ikke opplyst om hvilken virkningsgrad de benytter for solcellene, men siden utviklingen skjer raskt kan det hende den henger etter dagens industristandard. I tillegg er det mulig at den ikke tar like stort hensyn til effekten lavere temperaturer har på strømproduksjonen, som vist i kapittel 2.1.2.2. Figur 3-5 viser at den spesifikke solcellens effekt avtar med 0,27% / °C fra STC som

er 25°C. Siden solcellepanelets operasjonsområde spenner fra -40°C til +85°C (SunPower Maxeon, 2020), kan man anta at reduksjonen i solcellens effekt ved temperaturer over STC, vil virke motsatt ved temperaturer under STC. De betyr at om solcellepanelet er montert i et område med temperaturer lavere enn STC, vil man ha en økning i solcellens effekt, og dermed virkningsgrad, som vist i Figur 3-9.

Helt konkret viser Figur 3-9 at virkningsgraden til solcellepanelet vil i den varmeste måneden, juli i et normalår, ha økt med 0,8%, fra 22,3% til 23,1%. I den kaldeste måneden, januar i et normalår, vil virkningsgraden ha økt med 2%, fra 22,3% til 24,3%. Figuren viser også at 2022 var et litt varmere år enn normalåret, der normalåret har en årlig middeltemperatur på 1,1°C mens 2022 hadde en årlig middeltemperatur på 1,8°C (Norsk klimaservicesenter, 2023).



Figur 3-9: Effekten av en lavere temperatur på solcellens virkningsgrad sett i forbindelse med middeltemperaturen på Røros.

### 3.2.2 Helningsvinkel og asimut

Tabell 3-4 viser de vanligste takvinklene i Norge, ifølge byggevarehuskjeden Montér sin takkalkulator (Montér, 2023). I tillegg viser tabellen den gjennomsnittlige årlige solinnstrålingen ved hver vinkel med asimut 0°, beregnet ved hjelp av PVGIS. Lengst til høyre i tabellen er differansen disse vinklene har fra den optimale vinkelen for området ved Galåvolden Gård og Galåen Samdrift. PVGIS beregner denne til å være 41°, som gir en gjennomsnittlig årlig solinnstråling på 923,08 kWh/m<sup>2</sup> med asimut 0°. Som tabellen viser, utgjør ikke helningsvinkelen til panelene stor forskjell, med den største variasjonen på -3,89% fra optimal vinkel.

Tabell 3-4: Normale takvinkler i Norge og deres tilhørende gjennomsnittlige årlige solinnstråling ved asimut 0°

Tak/helningsvinkel [°]	Gjennomsnittlig årlig solinnstråling [kWh/m <sup>2</sup> ]	Variasjon fra optimal vinkel [%]
22	890,24	-3,56
27	904,99	-1,96
32	915,57	-0,81
40	923,05	-0,003
45	921,37	-0,18
60	887,19	-3,89

Hvilken retning en bolig ligger i landskapet påvirkes av mange faktorer som topografi, klima, tilgjengelig utsikt og personlige preferanser. Variasjonen i asimut kan dermed være stor, da retningen til solcellepanelene som regel følger retningen til taket eller veggen de er installert på. Tabell 3-5 viser at variasjonen i gjennomsnittlig årlig solinnstråling ved Galåvolden Gård og Galåen Samdrift er liten ved 22° helningsvinkel, om panelene er sørvendte innenfor ± 15° av asimut 0°. Ved asimut utover dette vil gjennomsnittlig årlig solinnstråling reduseres kraftig som Tabell 3-5 viser.

Tabell 3-5: Variasjon i asimut og den tilhørende gjennomsnittlige årlige solinnstråling ved 22° helning

Asimut [°]	Gjennomsnittlig årlig solinnstråling [kWh/m <sup>2</sup> ]	Variasjon fra optimal asimut [%]
-90	761,73	-14,4
-75	796,78	-10,5
-60	827,98	-7,0
-45	854,12	-4,1
-30	874,03	-1,8
-15	886,14	-0,5
0	890,24	0,0 %
15	885,89	-0,5 %
30	873,28	-1,9 %
45	853,06	-4,2 %
60	826,97	-7,1 %
75	795,7	-10,6 %
90	761,39	-14,5 %

For videre arbeid i denne oppgaven vil det bli brukt en takvinkel på 22° og asimut 0°, da den største takflaten på Galåen Samdrift har denne vinkelen og det er der det meste av energiproduksjonen vil foregå. Solcellepanelene vil dermed også ha denne helningsvinkelen og asimut, da det er mest hensiktsmessig å installere panelene i samme vinkel som taket. Er panelene montert i en større vinkel sammenlignet med taket de er montert på, kan det være fare for at solcellepanelene skygger for hverandre når solen står lavt på himmelen. På vinteren vil det være fare for at snøen glir ned fra panelet og samler seg bak panelet foran. Etter hvert som tiden går vil det samle seg opp mer og mer snø, som til slutt kan dekke panelene helt,

selv om det er temperaturer som normalt sett ville fått snøen til å gli av. Om panelene er montert i flukt med taket vil snøen gli uforstyrret fra ett panel til et annet, og til slutt ned fra taket.

### 3.3 Batteri

De to vanligste batteritypene å bruke til energilagring i et solenergianlegg er blybatteri og litium-ion-batteri. Litium-ion-batterier er dyrere enn blybatterier og har en høyere initialkostnad, men ser man på hele levetiden til batteriet er de likevel mer kostnadseffektive og har bedre ytelse enn blybatteri da de varer lengre og kan gjennomføre flere ladesykluser (Symeonidou, Zioga, & Papadopoulos, 2021).

### 3.4 Parametere

For å oppsummere vil parameterne i Tabell 3-6 bli brukt, med mindre noe annet er spesifisert.

*Tabell 3-6: Parametere som brukes i oppgaven*

Lokasjon	Galåvolden Gård og Galåen Samdrift
Solcellepanel	SunPower Maxeon 3 395W
Solinnstrålingsdatabase	SARAH2
Helningsvinkel	22°
Asimut	0°
Systemtap i PVGIS	0%
Batteritype	Litium-ion

## 4 Resultat

### 4.1 Energiproduksjon

Man kan regne ut totalt produsert energi av systemet ved å bruke følgende formel

$$E = A * \eta * S_A * PR \quad (4.1)$$

hvor

$A$  = Areal med solceller

$\eta$  = Virkningsgraden til solcellepanelet

$S_A$  = Solinnstråling per areal

$PR$  = Ytelsesforhold (engelsk: performance ratio), kan sammenlignes med systemtap i PVGIS – ekskludert virkningsgraden til solcellene.

$PR$  vil variere ut fra hvilke komponenter man bruker i solenergisystemet og deres virkningsgrad. En gjennomsnittlig  $PR$  på mellom 75% og 79% er sett på som vanlig i bransjen i nyere tid, og jeg velger derfor å sette den til 77% videre i denne oppgaven (Dhimish, 2022) (Urrejola, et al., 2016).



Tabell 4-1 viser de varierende månedskonstantene for solinnstråling per areal og virkningsgrad.

Tabell 4-1: Solinnstråling per areal og virkningsgrad for hver måned

	$S_A \left[ \frac{kWh}{m^2} \right]$	$\eta$ [%]
Januar	5,2	24,3
Februar	24,1	24,3
Mars	76,0	24,1
April	114,2	23,8
Mai	134,3	23,5
Juni	147,8	23,2
Juli	141,9	23,1
August	116,2	23,1
September	79,5	23,4
Oktober	38,3	23,7
November	10,3	24,1
Desember	2,4	24,3
<i>Totalt</i>	<i>890,24</i>	

## 4.1.1 Solcellepanel på alle tak

### 4.1.1.1 Måned

For å beregne hvor mye strøm som kan genereres totalt hvis man installerer solcellepanel på alle tak, benytter man formel (4.1). Variablene for  $\eta$ ,  $S_A$  og  $PR$  er nevnt tidligere, og det er kun  $A$  som mangler for å kunne regne ut energiproduksjonen. Arealet er antall solceller, som er nevnt i Tabell 3-2, multiplisert det med solcellens areal, som er nevnt i Figur 3-5. Det gir  $A = 2524,3 \text{ m}^2$ . Ved å bruke de konstante parameterne og variablene, vil årsproduksjonen for strøm fordele seg utover månedene som vist i Tabell 4-2.

Tabell 4-2: Månedlig strømproduksjon ved solcellepanel på alle tak

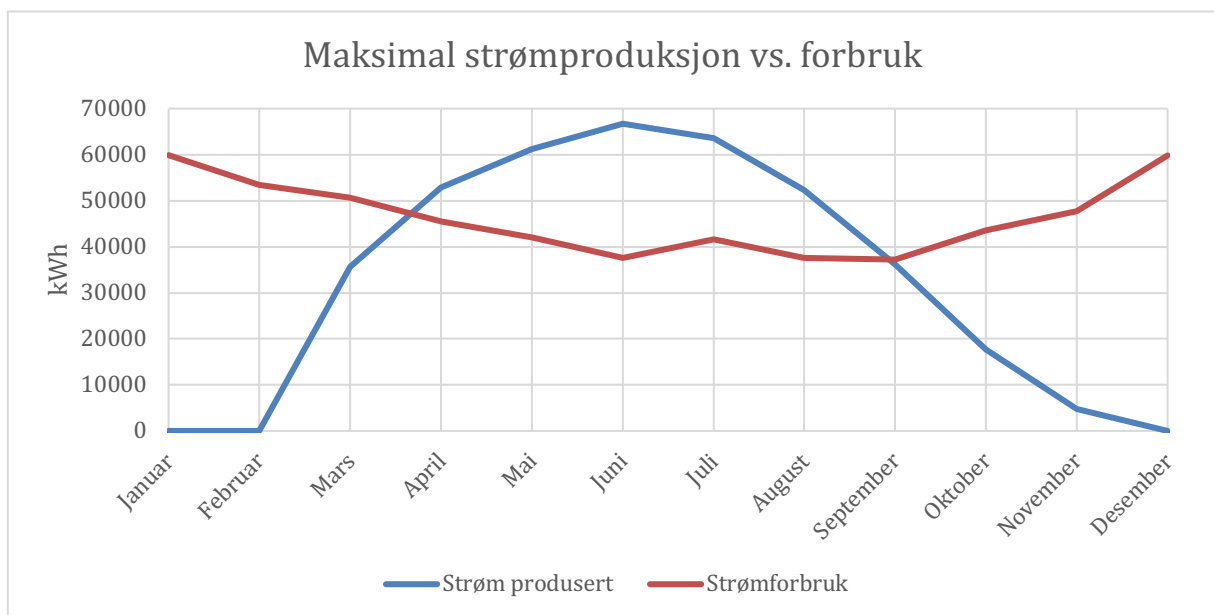
	<b>E [kWh]</b>
Januar	0
Februar	0
Mars	35 598
April	52 829
Mai	61 275
Juni	66 721
Juli	63 592
August	52 293
September	36 144
Oktober	17 660
November	4 802
Desember	0
<i>Totalt</i>	<i>390 914</i>

For eksempelvis juni, vil utregningen for energiproduksjon være

$$E_{\text{juni}} = 2524,3 \text{ m}^2 * 23,2\% * 147,8 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} * 77\% = 66\,721 \text{ kWh} \quad (4.2)$$

Ved å gjøre som i formel (4.2) for hver måned får man de månedlige verdiene som vist i Tabell 4-1, og totalt blir det en årlig strømproduksjon på 390 914 kWh. Det betyr at selv om alle tak dekkes med solcellepanel og mikronettet har et uendelig stort batteri, vil ikke det årlige strømbehovet på 556 575 kWh kunne dekkes, da det totale forbruket er 42,3% høyere enn den totale produksjonen. Anlegget vil ha en maksimal effekt på 564 kWp, som er effekten til solcellepanelet multiplisert med antall panel.

Som Figur 4-1 viser vil strømbehovet overstige produksjonen fra solcellene i vinterhalvåret, mens de vil generere et overskudd på sommerhalvåret. Om denne overskuddsstrømmen skulle bli lagret på et batteri for å brukes i de månedene det er strømunderskudd, må man vite hvor mye overskuddsstrøm som genereres de månedene det forekommer. Dette finner man ved å se på differansen mellom strøm produsert og strøm brukt i overskuddsperioden. Ved å sammenligne strømforbruket fra Tabell 3-2 med strømproduksjonen fra Tabell 4-2, kan man regne ut at overskuddsstrømmen i de månedene det er et overskudd, vil være 92 543 kWh. Det betyr at man trenger et batteri med denne kapasiteten for å spare all strømmen, med en effekt på minimum 150 kW da det er det som er den høyeste effekten som trengs for én time i mikronettet.



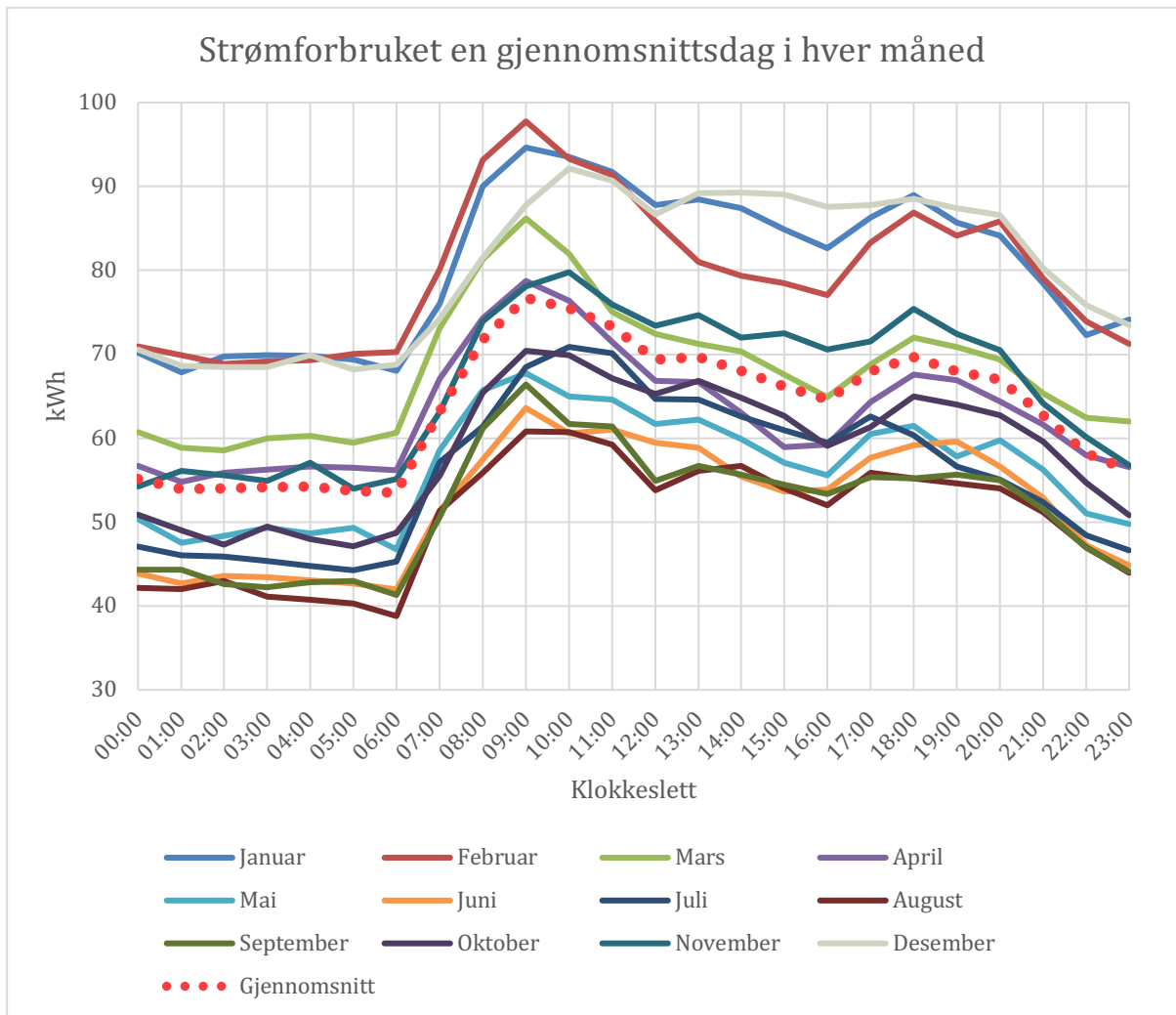
Figur 4-1: Strømproduksjon og strømforbruk ved solcellepanel på alle tak

Teslas Megapack har en kapasitet på 3,9 MWh, en effekt på 1 MW og en pris på \$1 979 084 inkludert skatt, men uten installasjon hvis den skulle blitt levert i Philadelphia, Pennsylvania, USA (Tesla, Inc. , 2023). Økes dette til å dekke behovet på 92,6 MWh må man ha 24 Tesla Megapack, med en total kapasitet på 94 MWh, effekt på 23,5 MW og en pris på \$41 069 419 inkludert skatt, men uten installasjon (Tesla, Inc. , 2023). I skrivende stund er dollarkursen på 11,19 kroner, som vil si at det ville kostet 459 538 874 kroner. Skulle dette blitt importert til Norge må det i tillegg betales frakt og MVA. på 25%. I følge Freightos Marketplace Estimator vil frakt for 37 Megapack fra Philadelphia til Oslo koste ca. \$40 000, som tilsvarer 447 573 kroner (Freightos, 2023). Her vil det måtte fortolles med MVA. på 25%, som vil gi en totalsum på 574 983 059 kroner. Deretter må det transporteres til Røros og installeres. Tesla anslår en installasjonspris på omtrent 70 000 000 kroner for disse 24 enhetene i USA (Tesla, Inc. , 2023), så en totalpris på omtrent 650 000 000 – 700 000 000 kroner er ikke utenkelig. Tar man øvrig estimat på 700 millioner kroner, vil det være 7 559,4 kr/kWh = 7 559 395 kr/MWh. Utover dette estimerer Tesla en vedlikeholdskostnad på omtrent 1 400 000 kroner i året (Tesla, Inc. , 2023).

Til sammenligning har det største batteriet i Norge, som har en effekt på 6MW og kapasitet på 7 MWh, på Svalbard, en pris på 40 000 000 kroner (Longyearbyen lokalstyre, 2023). Det vil tilsa en pris på 5 714,3 kr/kWh = 5 714 285,7 kr/MWh. Antar man at denne prisen er lineær vil et batteri på 92,6 MWh koste omtrent 530 000 000 kroner.

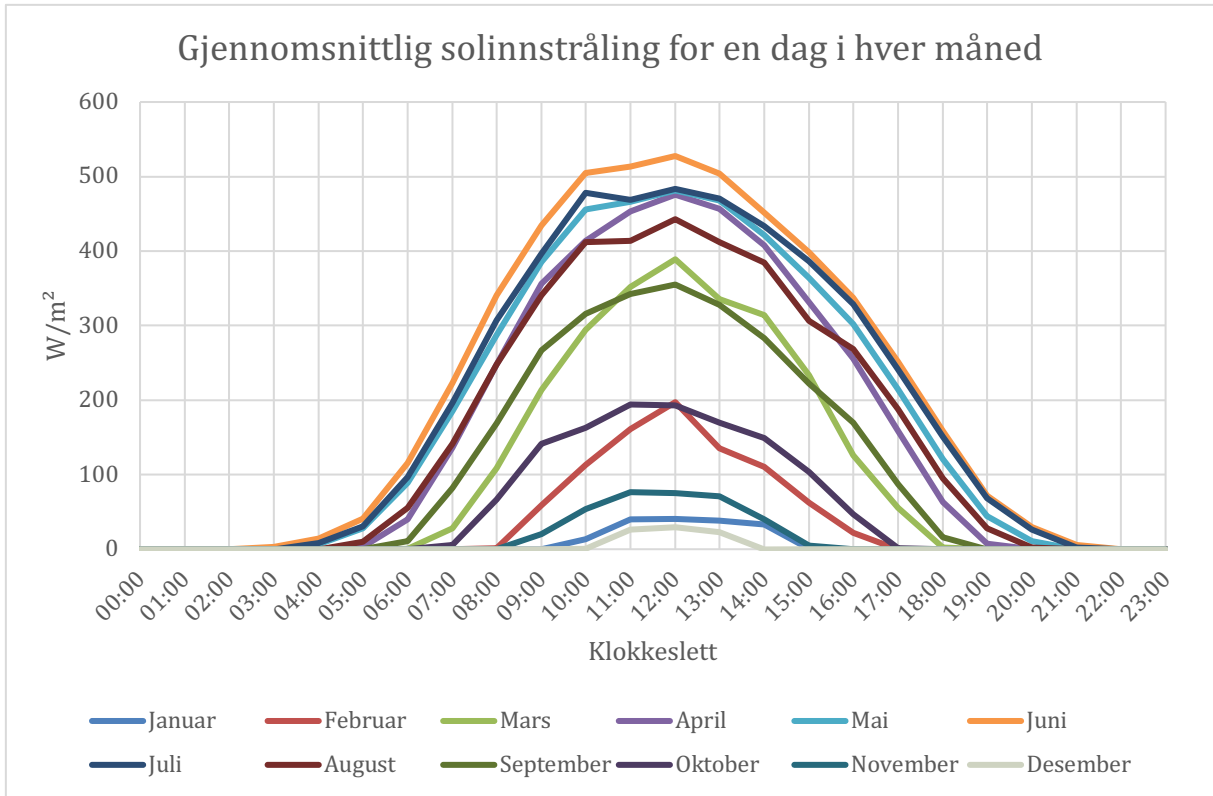
#### **4.1.1.2 Dag**

Ved å se på en gjennomsnittsdag for hver måned, vil man kunne få et bedre inntrykk for hva som kreves for å dekke energibehovet fra dag til dag. Som Figur 4-2 viser er det store variasjoner i strømforbruket innenfor én dag. På nattestid er det relativt stabilt, og klokken 06 frem til klokken 09 går forbruket kraftig opp, med dagstopp klokken 09. Etter det går forbruket litt nedover, frem til det får en ny opptur klokken 18 før det går ned utover kvelden.

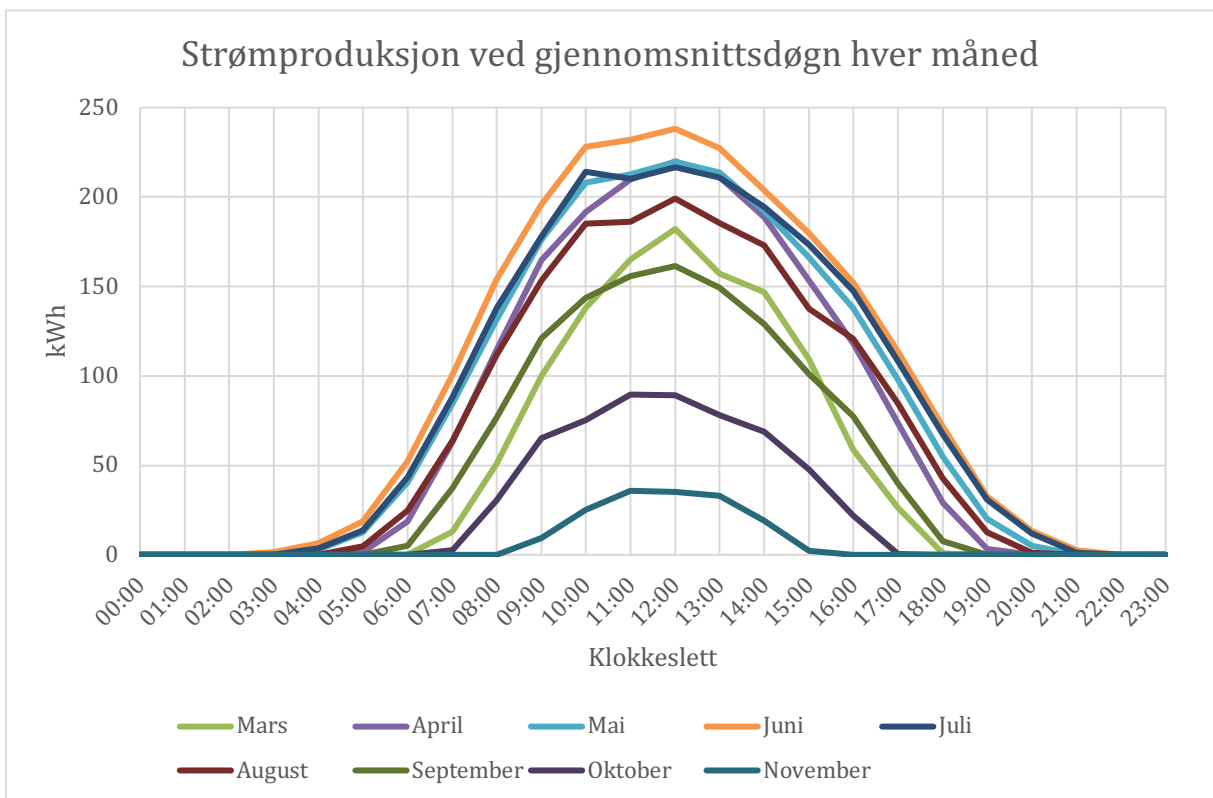


Figur 4-2: Gjennomsnittsstrømforbruk for hver dag – hver måned, totalt for alle enheter i mikronettet

For å kunne beregne energiproduksjonen til solcellene på dagsbasis må man vite hvor mye solinnstråling som treffer dem for hver time. Disse tallene er hentet fra PVGIS og er illustrert i Figur 4-3. Med dette kan produsert energi for en gjennomsnittsdag i hver måned beregnes, og det er vist i Figur 4-4.



Figur 4-3: Gjennomsnittlig global solinnstråling for en dag i hver måned



Figur 4-4: Gjennomsnittlig produsert strøm hver måned

## 4.1.2 Solcellepanel på tak B, C og D

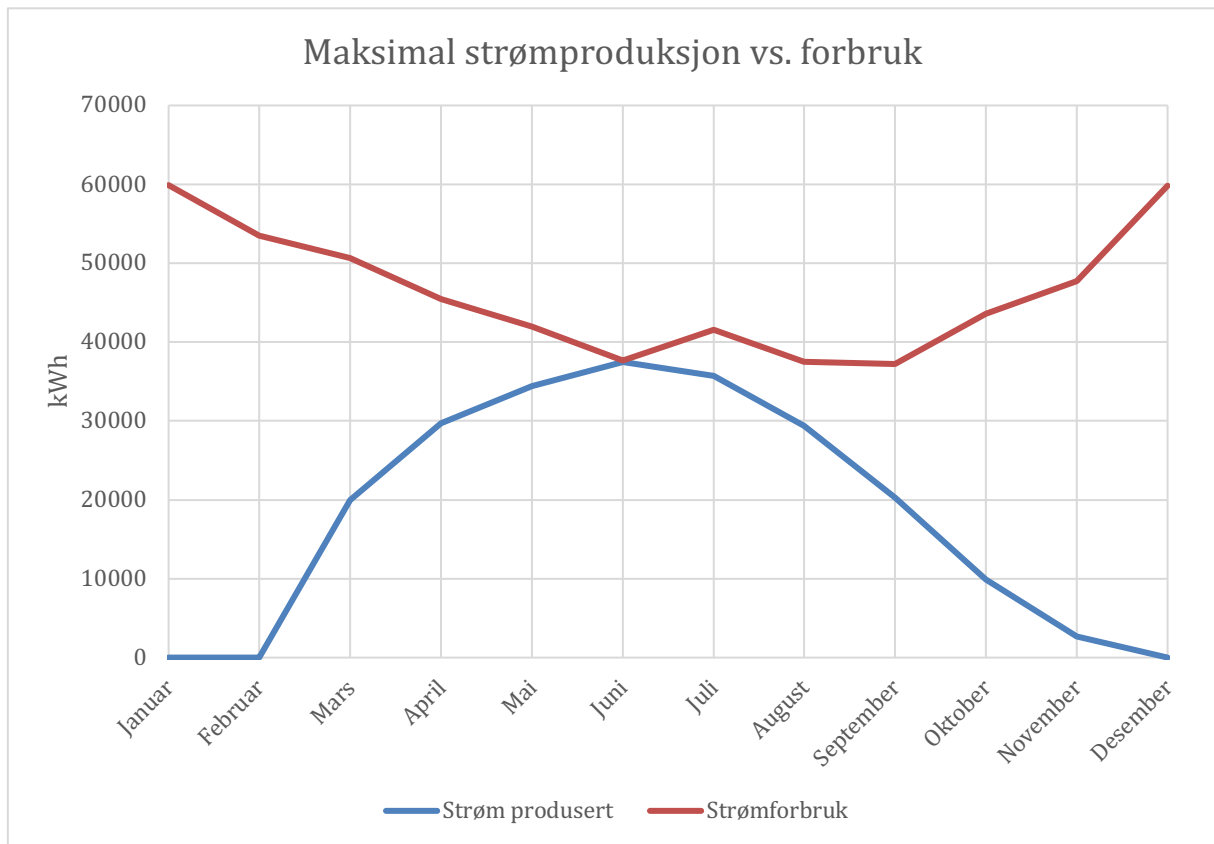
### 4.1.2.1 Måned

Ved å dekke tak B, C og D i Figur 3-4 med solcellepanel, vil det gi produksjon fra 802 solcellepanel tilvarende et areal på i underkant av 1418 m<sup>2</sup>. Bortsett fra endret areal er beregningene gjort på samme måte som i kapittel 0, med samme solinnstråling per areal og virkningsgrader som vist i Tabell 4-1. PR er også den samme på 77%. Årsproduksjonen for strøm vil fordele seg utover månedene som vist i Tabell 4-3. Anlegget vil ha en maksimal effekt på 316,8 kWp.

Tabell 4-3: Månedlig produksjon ved solcellepanel på tak B, C og D

	<b>E [kWh]</b>
Januar	0
Februar	0
Mars	19 993
April	29 670
Mai	34 414
Juni	37 472
Juli	35 715
August	29 369
September	20 300
Oktober	9 918
November	2 697
Desember	0
<i>Totalt</i>	<i>219 547</i>

Ved å dekke tak B, C og D med solcellepanel vil ikke energibehovet på månedsbasis dekkes for noen av månedene, som vist i Figur 4-5.

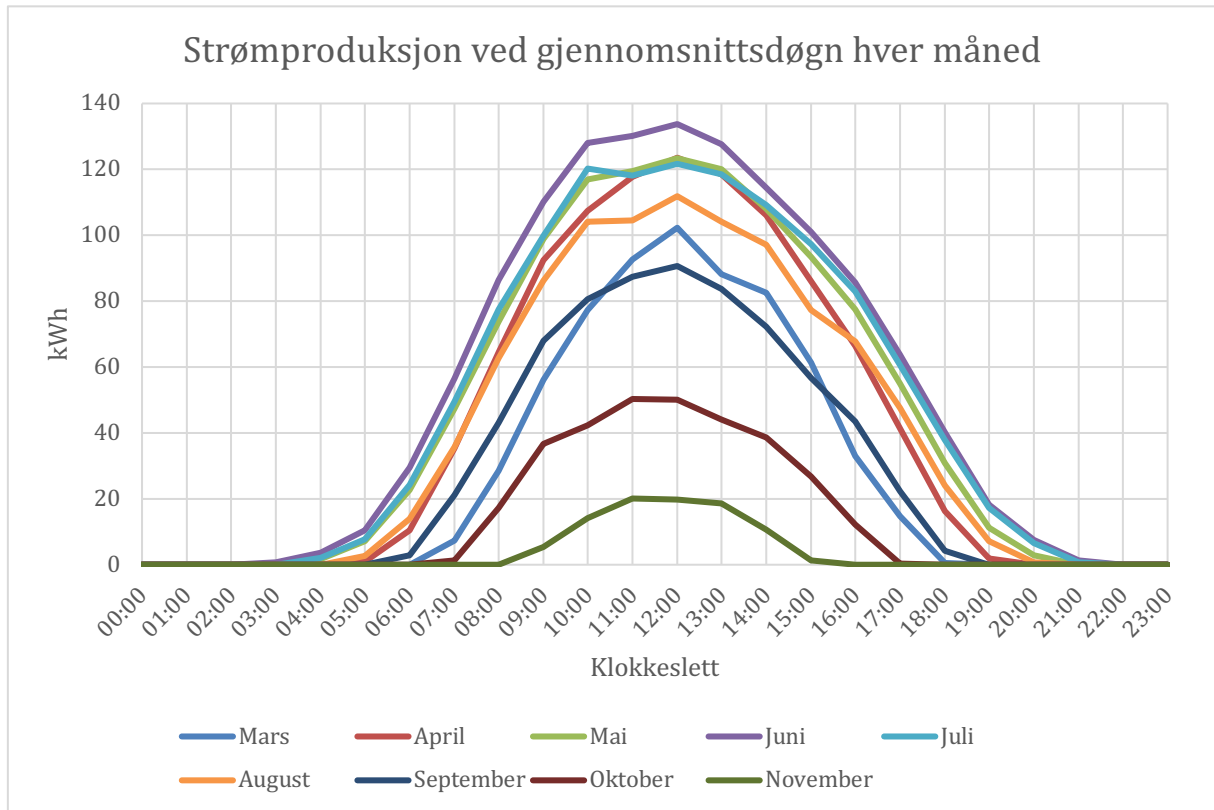


Figur 4-5: Strømproduksjon og strømforbruk ved solcellepanel på tak B, C og D



### 4.1.2.2 Dag

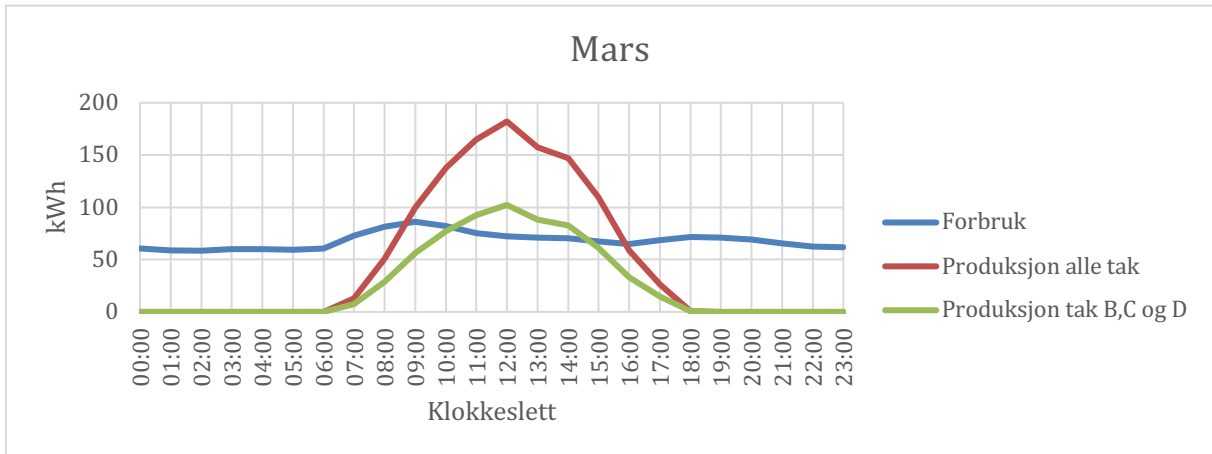
Energiproduksjonen for en gjennomsnittlig dag hver måned er vist i Figur 4-6. Sammenligner man dette med strømbehovet vist i Figur 4-2, vil man se at det ikke er nok produksjon for å dekke noen av timene i oktober og november.



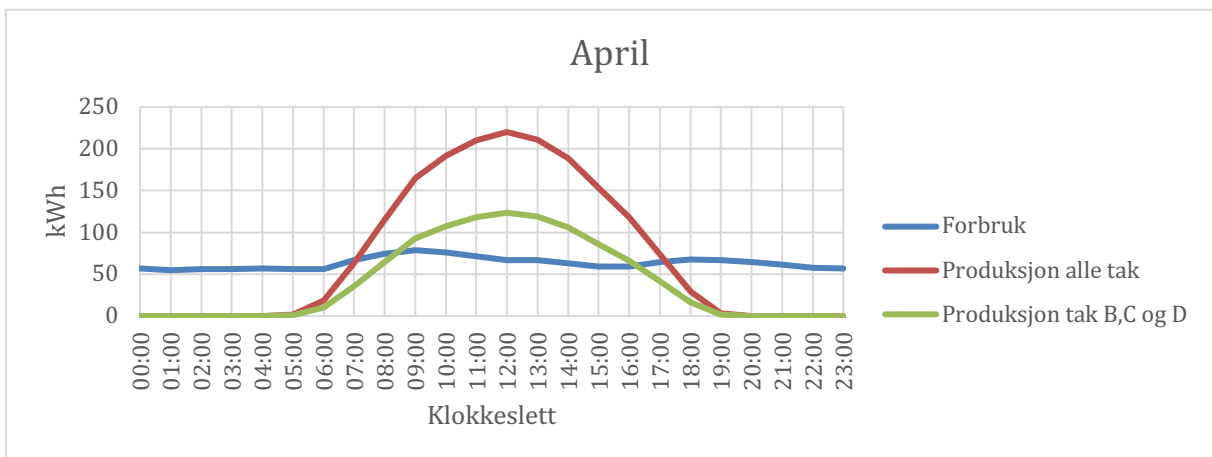
Figur 4-6: Strømproduksjon for et gjennomsnittsdøgn hver måned

### 4.1.3 Sammenligning

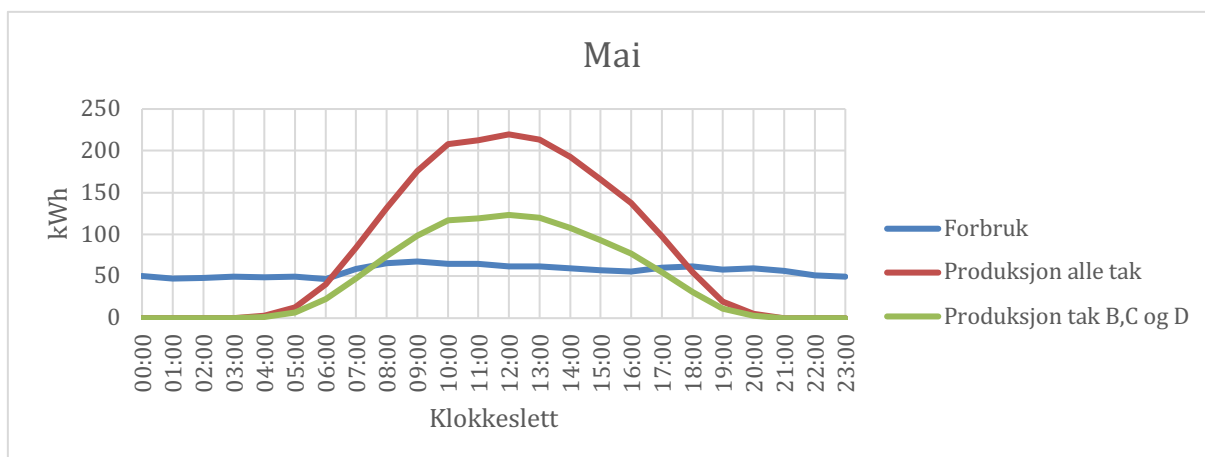
Ved å sammenligne dagsproduksjonen for anlegget med solcellepanel på alle tak og anlegget med solcellepanel på tak B, C og D, vil man få en bedre forståelse for generert strøm mot forbruket i de to alternativene, dette er illustrert månedsvis i Figur 4-7, Figur 4-8, Figur 4-9, Figur 4-10, Figur 4-11, Figur 4-12, Figur 4-13, Figur 4-14, og Figur 4-15.



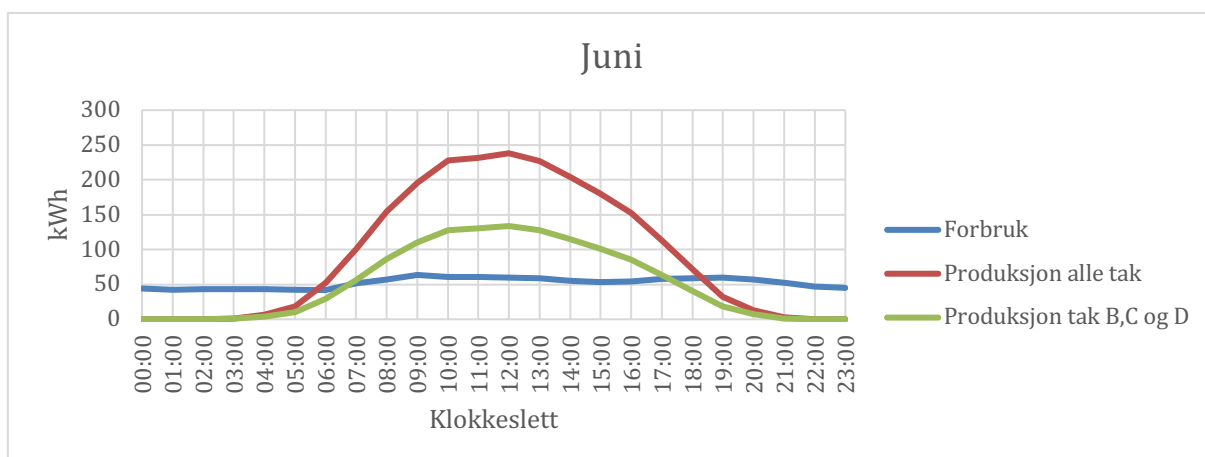
Figur 4-7: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i mars



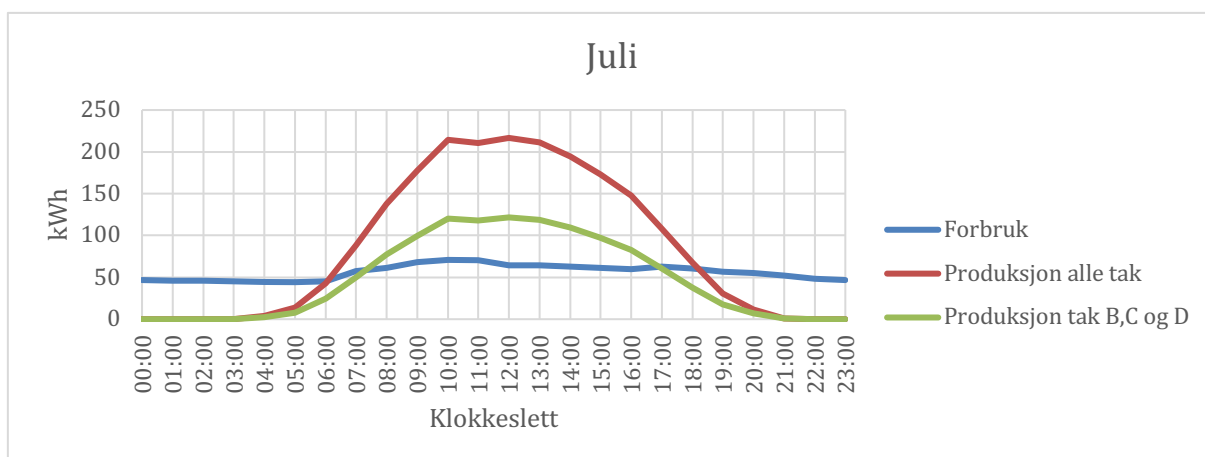
Figur 4-8: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i april



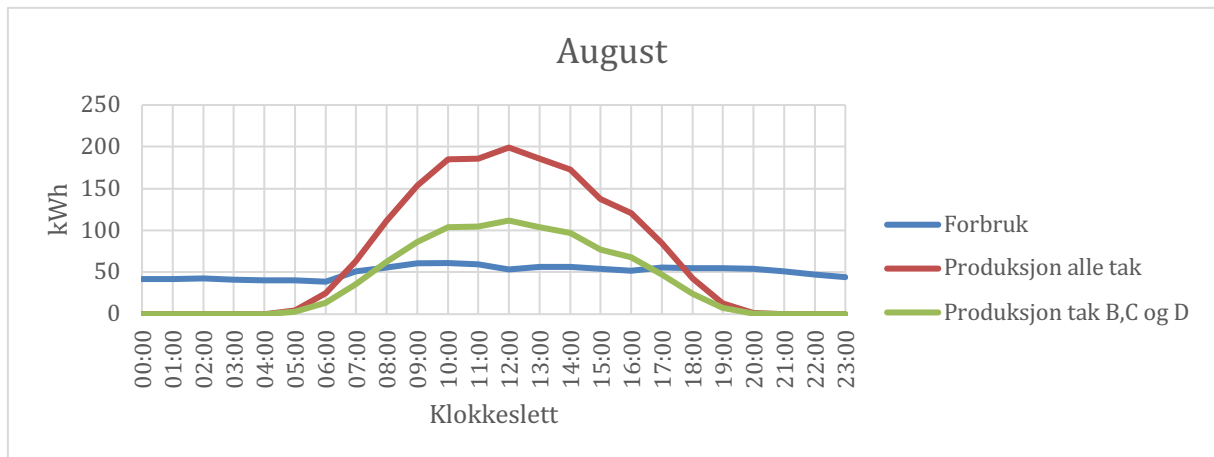
Figur 4-9: Strømforgbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i mai



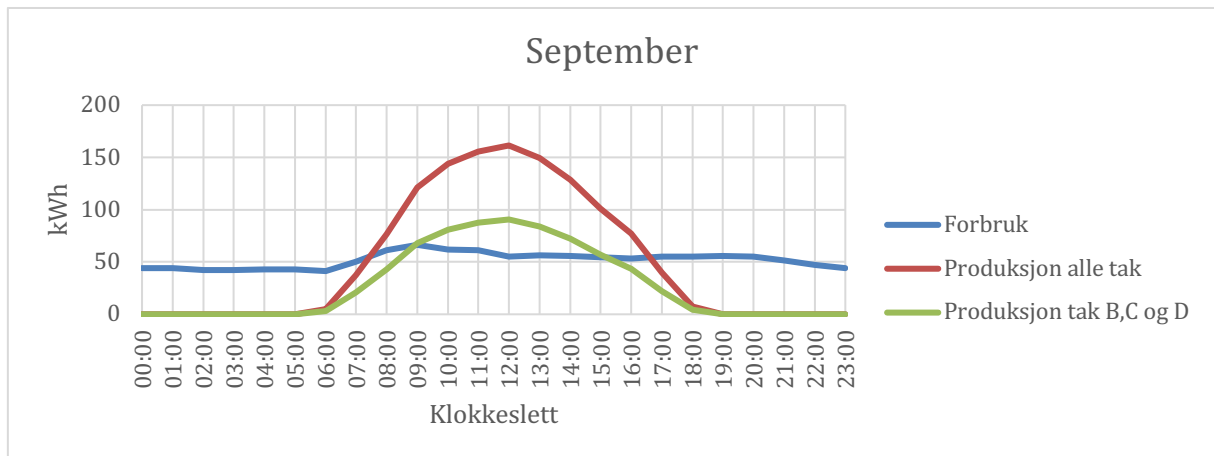
Figur 4-10: Strømforgbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i juni



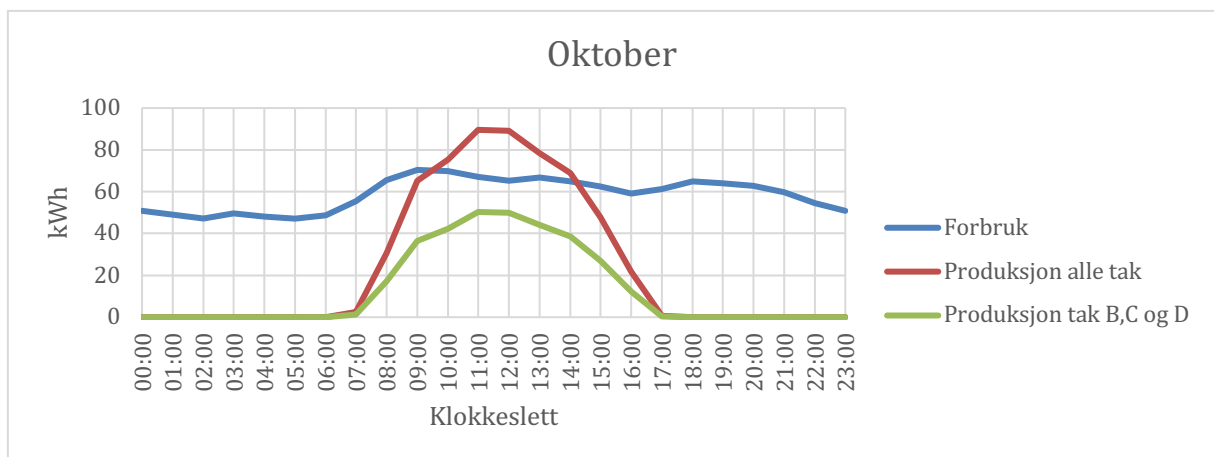
Figur 4-11: Strømforgbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i juli



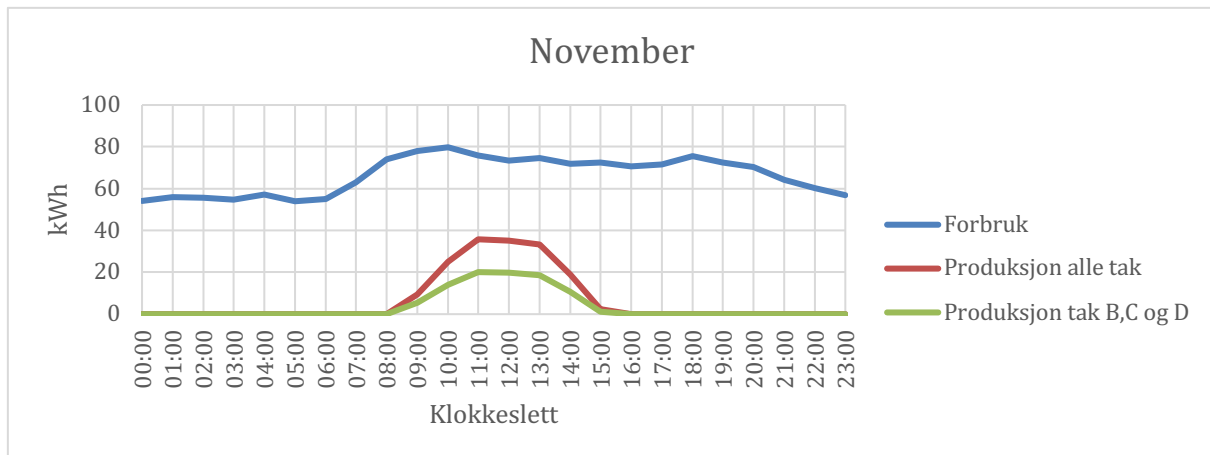
Figur 4-12: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i august



Figur 4-13: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i september



Figur 4-14: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i oktober



Figur 4-15: Strømforbruk og produksjon for en gjennomsnittsdag i november

For å se hvor stor kapasitet et batteri for energilagring på 1-dagsbasis må være, må man først finne strømbehovet. Ved å sammenligne Figur 4-7, Figur 4-8, Figur 4-9, Figur 4-10, Figur 4-11, Figur 4-12, Figur 4-13, Figur 4-14, og Figur 4-15, ser man at det er juni som er den måneden der forbruket overstiger produksjonen i flest timer. For systemet med solcellepanel på alle tak, vil det være fra omtrent klokken 05:30 til omtrent klokken 18:30, som er en periode på 14 timer. For systemet med solcellepanel på tak B, C og D vil det være fra omtrent klokken 07:00 til omtrent klokken 17:00, som er en periode på 11 timer. Ved å se på forbruket de tidspunktene og månedene det produseres mer strøm en det forbrukes, vil man fra Figur 4-2 se at det høyeste forbruket på én time er rundt 80 kWh.

Med en periode på 14 timer ved anlegget med panel på alle tak og et forbruk på maksimum 80 kWh på én time, vil et batteri med følgende kapasitet kunne lagre energi for bruk etter solen har gått ned

$$\text{Nødvendig batterikapasitet} = 14h * 80 \frac{kWh}{h} = 1120 kWh \quad (4.3)$$

Anlegget med panel på tak B, C og D har en periode på 11 timer, med bruk av formel (4.3), vil det blir en nødvendig batterikapasitet på 880 kWh.

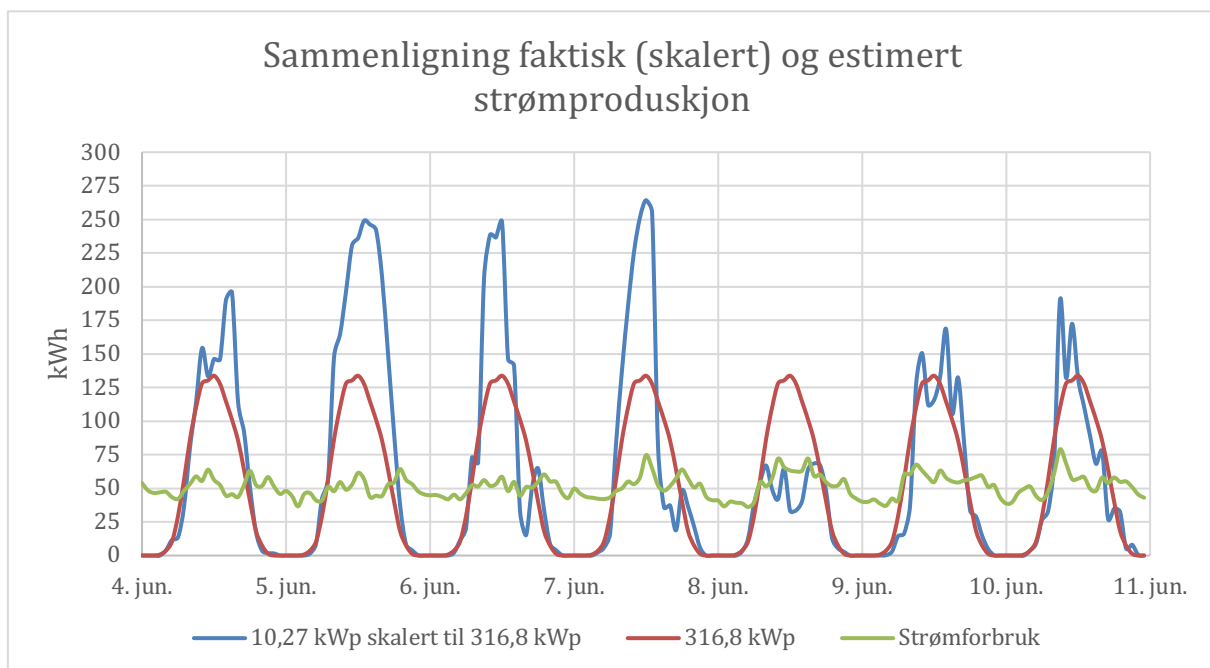
For å få et estimat på batteriprisen, kan man sammenligne med kr/kWh for både Megapack og batteriet på Svalbard, som nevnt i kapittel 4.1.1.1. For Megapack-versjonen vil prisen på et 1120 kWh batteri være omtrent 8 500 000 kroner, og for Svalbard-versjonen vil samme kapasiteten komme på omtrent 6 400 000 kroner. For 880kWh-batteriet vil det være noe

mindre, med omtrent 6 700 000 kroner for Megapack-versjonen, og omtrent 5 050 000 kroner for Svalbard-versjonen.

På Skagerak Arena ble det installert et batteri på 1 MWh i forbindelse med installasjon av et solenergianlegg. Hele anlegget kostet omtrent 34 millioner kroner, fordelt relativt likt på postene solceller, batteri og system (Powered by Telemark, 2023). Det vil tilsi en prislapp på batteriet på omtrent 11 500 000 kroner.

#### 4.1.4 Strømforsyning over flere dager

Gjennomsnittsdager vil ikke gi et reelt bilde på hvordan strømproduksjonen vil variere fra dag til dag. Noen dager vil det genereres mer strøm da det er finere vær, mens andre dager vil det genereres mindre strøm siden det er overskyet. Dette kan også variere fra time til time. Ved å se på en tilfeldig uke med strømproduksjon fra 10,27 kWp-anlegget som er montert på Galåen Samdrift, kan man få et innblikk hvordan produksjonen faktisk er. I Figur 4-16 er 10,27 kWp-anlegget skalert opp til 316,8 kWp-anlegget, altså det med solcellepanel på tak B, C og D, i tillegg er strømforbruket lagt inn. Som figuren viser vil dager med fint vær føre til en mye høyere strømproduksjon enn de estimerte produksjonsverdiene. I tillegg ser man at på overskyede dager vil den faktiske strømproduksjonen være mye lavere enn den estimerte strømproduksjonen.



Figur 4-16: Sammenligning mellom reelt (skalert) og estimert strømproduksjon for en tilfeldig uke i juni

Som Figur 4-16 viser, vil tidspunktet strømproduksjon starter og slutter, variere fra dag til dag. Generelt vil strømproduksjonen så vidt begynne rundt klokken 04:00 frem til omtrent klokken 21:00. Til forskjell fra de estimerte dagene vil man i dette tilfellet ikke ha en produksjon som overstiger forbruket i dette tidsrommet hver dag. For eksempel den 8. juni er det bare klokken 08:00, 16:00 og 17:00 der produksjonen så vidt overstiger forbruket, hvor klokken 08:00 er det meste med 15,4 kWh differanse.

I Tabell 4-4 er det listet hvor mange timer i løpet av uken i juni produksjonen overstiger forbruket, samt hvor mye strøm overskuddet er på. De timene som er merket med en strek -, er timer der produksjonen ikke overstiger forbruket. Verdiene i tabellen er i kWh.

Tabell 4-4: Timer strømproduksjonen overstiger forbruket, og hvor mange kWh overskuddet er for den respektive timen

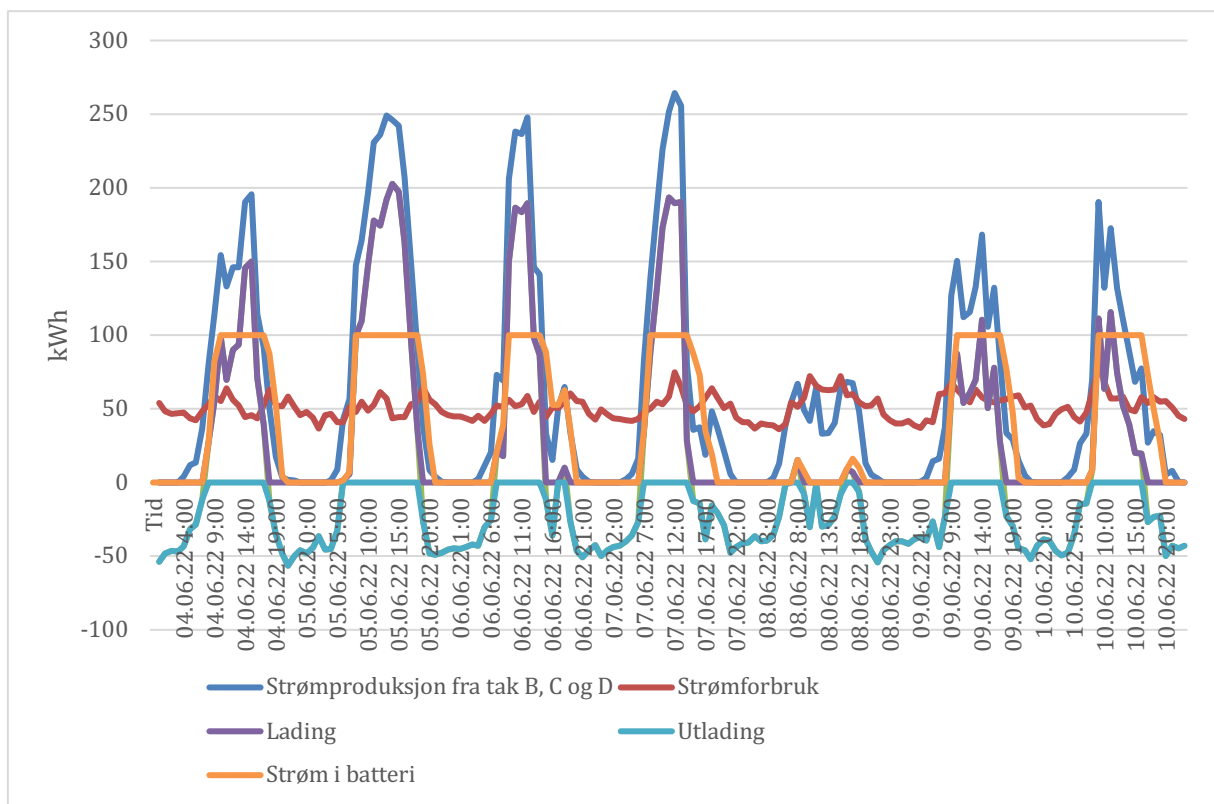
Kl. \ Dag	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Totalt
04.jun	-	-	27	55	99	69	90	93	146	150	71	40	-	840
05.jun	2	6	100	110	148	178	175	192	203	198	163	97	37	1606
06.jun	-	21	18	150	187	183	189	98	87	-	-	-	10	943
07.jun	-	35	88	131	173	194	190	190	28	-	-	-	-	1030
08.jun	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	9	7	-	32
09.jun	-	-	-	59	87	54	61	69	111	51	78	28	-	599
10.jun	-	-	8	111	64	116	75	52	39	20	19	-	-	504

Ved slike perioder kan det være utfordrende å beregne hvor stor batterikapasitet som vil være nødvendig, da man ikke bare kan se på hvor mye av overskuddet på dagtid som må lagres for bruk når det er mørkt. Her må systemet ha nok kapasitet til å lagre energi flere dager frem i tid om nødvendig. Får å finne dette må man se på forholdet mellom forbruk og produksjon, og hvilke timer man har et overskudd av strøm og hvilke timer man har et underskudd av strøm fra solcellepanelene. Dermed vil man se potensialet både for oppladning og utladning av batteriet, i forbindelse med overskudd og underskudd av strømproduksjon. Er det mange timer med overskudd etter hverandre vil batteriet fortsette å lades opp, frem til det er fullt. Ved

å se på denne uken i juni, og legge inn produksjon fra solcellepanelene på tak B, C og D, samt strømforbruket over disse timene, kan man nå bestemme hvor stort batteri man må ha for å kunne være selvforsynt disse dagene.

De timene man har et overskudd blir strømmen lagret på batteriet, helt til batteriet blir fullt. Når batteriet er fullt kommer an på kapasiteten, og det er her utfordringen ligger. Batteriet må ha stor nok kapasitet til å kunne lagre nok strøm for hele uken, om det skulle være en uke med veldig varierende vær.

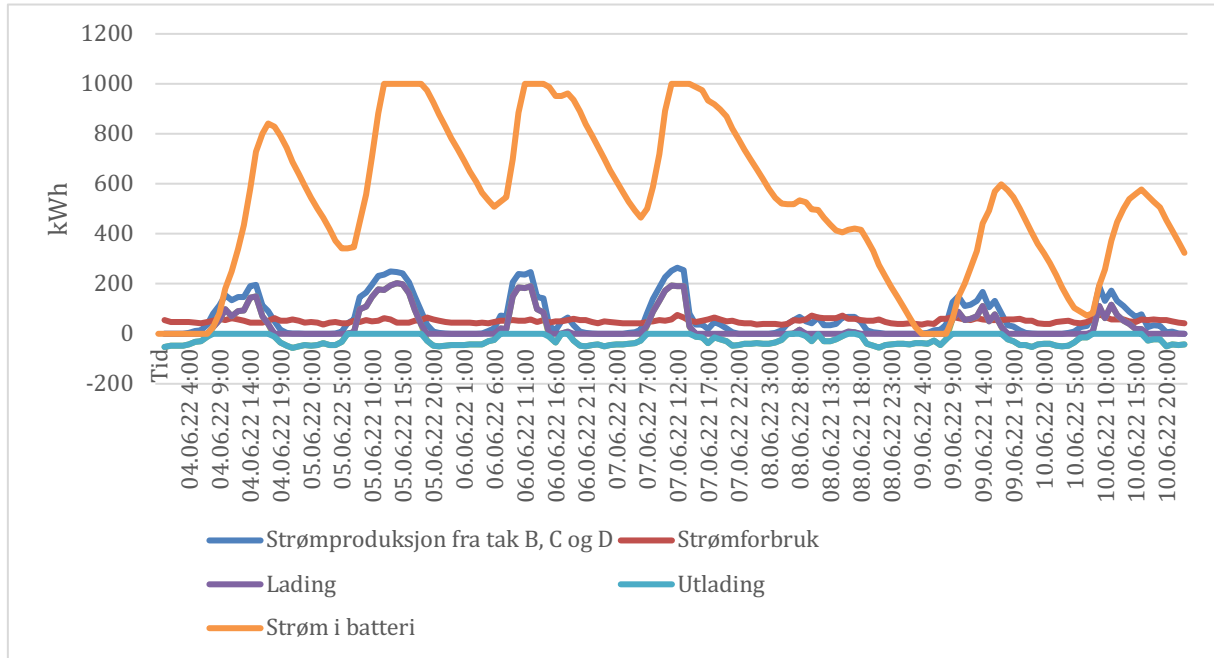
Ut fra Figur 4-17 kan man se at et batteri på 100 kWh ikke har nok kapasitet til å dekke behovet for én dag. Ved å se på hvor mange av timene solcelleanlegget og/eller batteriet dekker strømbehovet, kan man gi det en selvforsyningsgrad. Legg merke til at batteriet starter tomt siden man kun ser på denne tidsskalaen, og når beregningen starter på natten vil strømproduksjonen være 0 og batteriet vil være tomt. Ved beregning av selvforsyningsgrad er dette tatt hensyn til, og er dermed ikke kalkulert med i selvforsyningsgraden. For dette alternativet er selvforsyningsgraden 49,4%, som betyr at solenergisystemet dekker strømbehovet for disse dagene nesten halvparten av tiden.



Figur 4-17: Ukeoversikt juni for solenergisystem med et 100 kWh batteri

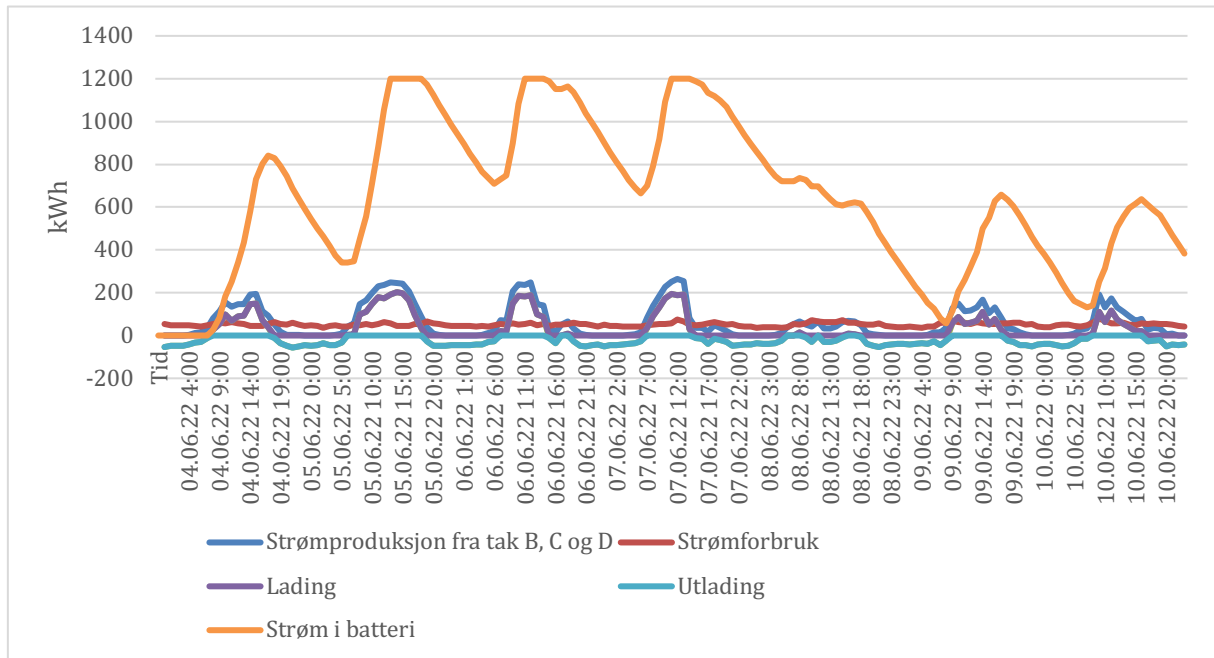


Figur 4-18 viser at med et batteri på 1000 kWh nesten har nok kapasitet for å dekke hele behovet, men at det vil være tomt noen timer tidlig på morgenen den 9. juni. Selvforsyningsgraden er her 92,26%.



Figur 4-18: Ukeoversikt juni for solenergisystem med et 1000 kWh batteri

Et batteri på 1200 kWh vil akkurat ha nok kapasitet til å dekke energibehovet denne uken, som vist i Figur 4-19. Når behovet er dekket, vil selvforsyningsgraden være 100%, slik som i dette tilfellet.



Figur 4-19: Ukeoversikt juni for solenergisystem med et 1200 kWh batteri

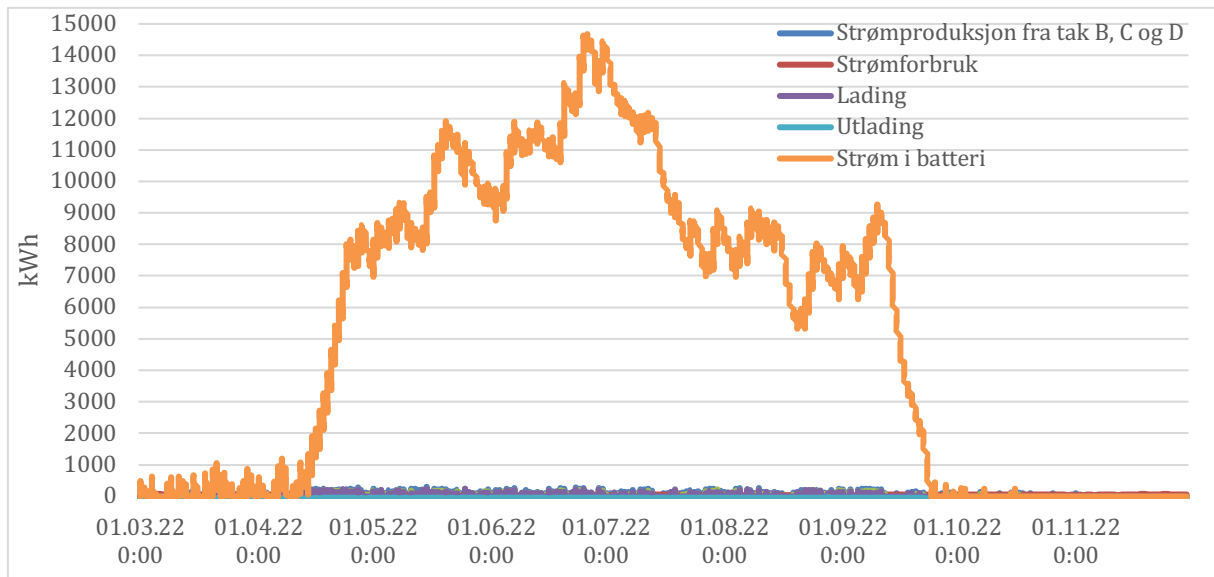
Ser man på hva et slikt batteri med en kapasitet på 1200 kWh vil koste med bakgrunn i kroner per kWh for både Megapack og batteriet på Svalbard, som nevnt i kapittel 4.1.1.1, vil det for Megapack-versjonen koste omtrent 9 100 000 kroner. For Svalbard-versjonen vil samme kapasitet koste omtrent 6 900 000 kroner.

Dette er et hvordan det ville sett ut midt på sommeren når strømforbruket er lavt og produksjonen er høy, generelt sett.

Tar man dette ett steg videre og skalerer 10,27 kWp-anlegget opp til 316,8 kWp-anlegget for månedene mars til november med et uendelig stort batteri, ser grafen ut som i Figur 4-20. Her ser man at strømproduksjonen overstiger forbruket i stor fra april til september, og at med et teoretisk uendelig stort batteri så ville man kunne leve selvforsynt i alle disse månedene.

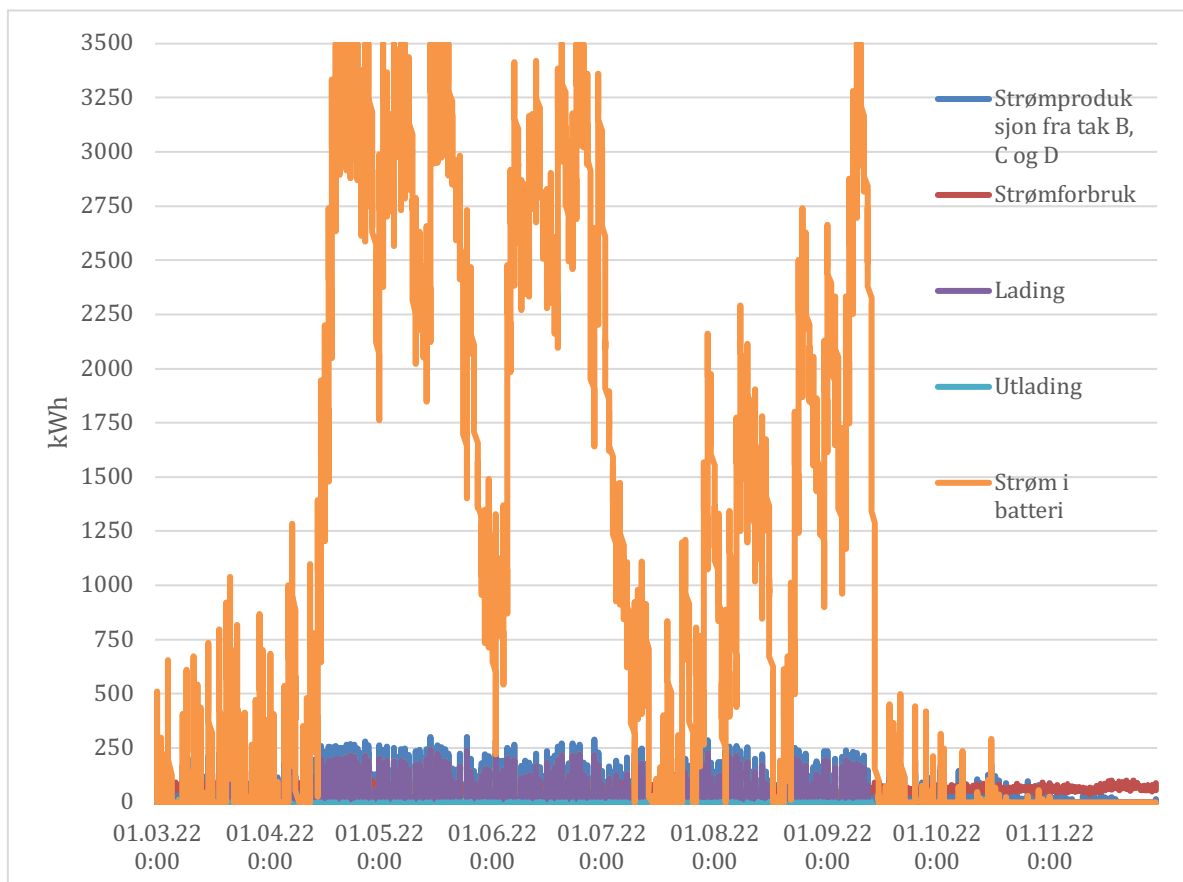
Som figuren også viser så er det et tak på hvor mye overskudd som kan bli produsert, og det er på omtrent 14 500 kWh. Prisen for et slikt batteri vil for Megapack-versjonen være omtrent 111 000 000 kroner, og for Svalbardversjonen koste omtrent 83 000 000 kroner.

Selv ved en slik batteristørrelse vil selvforsyningsgraden kun være 69,3%.



Figur 4-20: Oversikt fra mars til november for solenergisystem et uendelig stort batteri

Om man går motsatt vei, og sier man ønsker å bruke omtrent 20 millioner kroner på et batteri, så vil det for Svalbard-varianten være en kapasitet på 3500 kWh. Det vil gi en graf som vist på Figur 4-21. Dette systemet har en selvforsyningsgrad på 65%.



Figur 4-21: Oversikt fra mars til november for solenergisystem 3500 kWh-batteri

## 5 Diskusjon

### 5.1 Økonomi

Det har tidligere i kapittel 4.1 blitt nevnt noe om prisen på batteri for de ulike alternativene, men ikke noe pris for de andre komponentene i solenergisystemet. I tillegg til batterikostnaden vil det komme utgifter til solcellepanel, vekselrettere, installasjonskostnader og andre systemkostnader som kabler og styringsenheter. Disse prisene vil variere ut fra størrelsen på anlegget.

I tillegg må man se på hvor mye som spares inn med tanke på reduksjon i strømutfgifter til energiselskap og nettleie. Forholdet mellom dette, og hvor lang tid det tar, gi en indikasjon på hvor lang nedbetalingstiden er på anlegget.

Som nevnt i kapittel 3.1, er prisen på solcellene brukt til å estimere disse anleggene ca. 4800 kroner per stykk. For et system på denne størrelsen kan man anta at man vil få en kvantumsrabatt, som jeg estimerer til å være på -10%.

For å finne hvor stor vekselretter som trengs, må man vite hvor effekt den må tåle. Ser man på anlegget med solceller på tak B, C og D, vil det ha en installert effekt på 316,8 kWp. Prisen på vekselrettere avtar per watt etter som man går opp i størrelsen på vekselretteren. Å finne vekselretter med denne størrelser er ikke enkelt, så her må man gjøre en tilnærming. Den største vekselretteren de har hos Elektroimportøren AS er på 60 kW, og koster 43 000 kroner (Elektroimportøren AS, 2023). Pris for en til dette anlegget vil da være på rundt 215 000 kroner. Vekselrettere har en kortere levetid enn solcellepanelene, og det antas at den må byttes én gang i løpet av anleggets levetid.

Prisen på installasjon, kabler og styresystem har jeg ingen konkrete tall på, men jeg antar at det vil være ca. 20% av totalkostnaden.

Reduksjon i strømutfgifter vil variere, ut fra hvor dyr strømmen og nettleien er. Tar man et overslag på reduksjon i strømforbruk på anlegget som dekker tak B, C og D, og bruker de dataene i kombinasjon med verdiene i Figur 2-17, og strømprisen vil man få en strømbesparelse på omtrent 1 000 000 kroner i året. Samtidig vil overskudsstrømmen fra solcelleanlegget også kunne bli solgt, men i dette estimatet er ikke det tatt med.

Alt dette kombinert gir en estimert pris på solcelleanlegget som vist i Tabell 5-1.

Tabell 5-1: Estimerte kostnader ved installasjon av solcellepanel på tak B, C og D samt et batteri med kapasitet på 3,5 MWh

Vare	Antall	Pris pr/stk [kr]	Rabatt	Totalt [kr]
Solcellepanel SunPower Maxeon 3, 390W	802	4800	-10%	3 464 640
Vekselretter	2	215 000	-	430 000
Batteri 3,5 MWh	1	20 000 000	-	20 000 000
Installasjon og systemkostnader				5 000 000
<i>Ca. totalpris</i>				<i>29 000 000</i>

Ser man den totale anleggsprisen opp mot strømbesparelsen hvert år på rundt 1 000 000 kroner, vil anlegget nedbetale seg selv på ca. 29 år. Hadde man sendt overskuddsstrømmen ut på nettet i stedet for å ha et batteri, ville dette regnestykket se helt annerledes ut da batterikostnaden står for 2/3 av anleggsprisen. Prisen ville da blitt 9 000 000 kroner, med en nedbetalingstid på under 10 år.

## 5.2 Solenergisystemet

Ser man på strømproduksjonen fra tak B, C og D som er anlegget med en effekt på 316,8 kWp, estimert med solinnstrålingsdata fra PVGIS, får man en årlig strømproduksjon på omkring 230 000 kWh. Sammenligner man dette med oppskaleringen av det eksisterende 10,27 kWp-anlegget til 316,8 kWp-anlegget, som har en årlig strømproduksjon på 270 000 kW, ser man at det er en vesentlig forskjell. Jeg legger mer lit i dataene fra det skalerte anlegget, da det baseres seg på faktisk produksjon, og ikke estimerer.

Per dags dato er det ifølge norske lover ikke lov til å danne mikronett uten å gå gjennom omfattende prosesser for å få konsesjon. I denne oppgaven er det ikke sett på lovverket rundt dette, men for å kunne redusere nettbelastningen vil det å danne mikronett være et godt argument for å få endret på dette lovverket.

I fremtiden vil det også kunne være mulig å bruke batteriene til elbiler som for eksempel hytteboere har, som ekstra batterikapasitet i mikronettet. På hytter trengs det veldig lite strøm

når det ikke er mennesker der, og når menneskene er der er også elbilene det, forutsatt at de har elbiler. Som dette mikronettet viser er ikke hyttene de største forbrukerne av strøm, men batteriene kan hjelpe til å flate ut effekttoppene.

Et mikronett med mulighet til å drifte seg selv i øydrift over lengre tid vil være en stor sikkerhet for brukerne i nettet, og gi høy forsyningssikkerhet. Skulle strømmen fra kraftnettet dette ut, vil likevel mikronettet kunne forsyne seg selv med strøm over lengre perioder, avhengig av størrelsen på batteriet. For alternativet med solceller på tak B, C og D, og et batteri på 3,5 MWh, vil de være selvberget med strøm fra midten av april til midten av juli, som vist i Figur 4-21. For et gårdsbruk som har ansvar for dyr, og der mangelen av strøm kan direkte påvirke dyrenes velferd. Ku-fjøs kan ha automatiske foringsmaskiner og melkeanlegg, og om strømmen går så er dette oppgaver bonden må gjøre for hånd. Har bonden et fjøs med 200 dyr så rekker ikke bonden dette, og det vil gå utover dyrene. Ved å bruke solenergi vil man kunne klare seg mye lengre ved et strømbrudd, og for mange vil denne tryggheten være verdt mer enn det man ser i fysisk besparelse av kroner og øre.

Som nevnt i oppgaven vil det ikke være noe energiproduksjon i månedene januar, februar og desember siden solcellepanelene vil være dekket av snø disse månedene, og produksjonen vil være tilnærmet ingenting. I tillegg står solen veldig lavt på himmelen disse månedene, som betyr at solceller med en helningsvinkel på  $22^\circ$  uansett ikke ville vært veldig effektive til å produsere strøm. Hadde man montert solcellepanel på veggene i tillegg, vil man unngå problemet med snø, samtidig som at helningsvinkelen på  $90^\circ$  vil være tilnærmet optimal for strømproduksjon.

Når det gjelder inntjening i form av besparelse av kjøpt strøm, er det mange variabler som spiller inn. Som nevnt er det en aktiv strømstøtteordning nå, som gjør at strømmen blir billigere, men dette er kun en midlertidig ordning som antas å være i effekt over flere år. I tillegg kom det en ny nettleiemodell i med virkning fra 2023, og Røros E-verk Nett as opplyser om at i årene 2024-2026 så forventes nettpriene å synke noe fra 2023-modellen (Røros E-verk Nett as, 2023). Dette viser at det alltid vil være endringer i prisen på strøm, så den reelle besparelsen i kroner og øre vil variere veldig fra år til år. Dette vil ha en innvirkning på nedbetalingstiden til solcelleanlegget.

## 6 Konklusjon

Formålet med denne oppgaven var å utforske hvilke solenergisystem som ville være de mest hensiktsmessige for å minimere belastningen på det lokale strømnettet på Røros. Det ble gjort ved å se på dimensjonering av solenergianlegg og batteripakker i et mikronett.

Gjennom analysen av mulige kombinasjoner på hvordan man på en mest hensiktsmessig måte kan bruke et solenergisystem med solceller og batteri i et mikronett, for å minimere belastningen på det lokale strømnettet på Røros, har jeg kommet frem til en anbefaling. Ved å installere solcellepanel på tak B, C og D på fjøset til Galåen Samdrift, vil man i løpet av et år kunne produsere oppimot 270 000 kWh strøm, på et anlegg med 316,8 kWp og 802 solcellepanel. Kostnadene på dette ville blitt rundt 9 millioner kroner, med en nedbetalingstid på under 10 år. Kombineres dette med et batteri vil prisen øke betraktelig, der for eksempel et batteri 500 kWh ville gi en selvforsyningsgrad på 50% til en pris av omtrent 10 millioner kroner som gir en nedbetalingstid på 10 år. På den andre siden av skalaen kan et batteri på 3,5 MWh, gi en selvforsyningsgrad på 65%. Dette til en pris av 29 millioner kroner som gir en nedbetalingstid på 29 år.

## Bibliografi

- Aldous, S., & Homer, T. (2023, mai 19). *How Do Solar Panels Work?* Hentet fra HowStuffWorks: <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/solar-cell.htm>
- Bentzen, A. (2023, mai 30). *Sunpower 400W- verdens beste solceller*. Hentet fra Otovo: <https://www.otovo.no/blog/solcellepanel-solceller/sunpower-solcellepaneler/>
- Cieslak, K., & Dragan, P. (2018). Comparison of the existing photovoltaic power plant performance simulation in terms of different sources of meteorological data. *E3S Web of Conferences (Vol. 49, p. 00015)*.
- CINELDI. (2023, mai 17). Hentet fra CINELDI: <https://www.sintef.no/projectweb/cineldi/>
- Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon. (2022, juni 14). *NOU 2022: 6 - Nett i tide*. Hentet fra Regjeringen: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2022-6/id2918464/>
- Dhimish, M. (2022, Oktober). Thermal impact on the performance ratio of photovoltaic systems: A case study of 8000 photovoltaic installations. *Case Studies in Thermal Engineering, 21, 100693*.
- Ecoprogetti. (2023, mai 22). *What is the raw material that composes a photovoltaic module?* Hentet fra Ecoprogetti: <https://ecoprogetti.com/the-structure-of-photovoltaic-module/>
- EERE. (2023, mai 21). *Multijunction III-V Photovoltaics Research*. Hentet fra Office of Energy Efficiency & Renewable Energy: <https://www.energy.gov/eere/solar/multijunction-iii-v-photovoltaics-research>
- Elektroimportøren AS. (2023, mai 31). *Vekselrettere*. Hentet fra Elektroimportøren: <https://www.elektroimportoren.no/afore-inverter-60kw-400v/6607256/Product.html>
- European Commission. (2023, mai 28). *Photovoltaic Geographical Information System*. Hentet fra EU Science Hub: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)
- European Union. (2023, mai 25). *Getting started with PVGIS*. Hentet fra EU Science Hub: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis_en)



- Freightos. (2023, mai 29). *Free Container Shipping Cost Calculator*. Hentet fra Freightos: <https://www.freightos.com/freight-resources/container-shipping-cost-calculator-free-tool/>
- Gunvaldsen, I., Mathiesen, S., & Rosvold, K. A. (2023, mai 15). *batteri*. Hentet fra Store norske leksikon: <http://snl.no/batteri>
- Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., & Ismail, I. M. (2017, September). Tilt and azimuth angles in solar energy applications–A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 77, ss. 147-168.
- Hofstad, K. (2023, mai 17). *solenergi*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/solenergi>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2023, mai 19). *Conduction in Semiconductors*. Hentet fra PV Education: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/conduction-in-semiconductors>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2023, mai 20). *Effect of Temperature*. Hentet fra PV Education: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2023, mai 18). *Energy of Photon*. Hentet fra PV Education: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/energy-of-photon>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2023, mai 20). *Fill Factor*. Hentet fra PV Education: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2023, mai 21). *Multi Crystalline Silicon*. Hentet fra PV Education: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing-si-cells/multi-crystalline-silicon>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2023, mai 19). *Semiconductor Structure*. Hentet fra PV Education: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/semiconductor-structure>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2023, mai 21). *Single Crystalline Silicon*. Hentet fra PV Education: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing-si-cells/single-crystalline-silicon>

- IEA. (2023, mai 20). *Share of cumulative power capacity by technology, 2010-2027*. Hentet fra IEA: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-cumulative-power-capacity-by-technology-2010-2027>
- Kenny, D., & Fiedler, S. (2022, Januar 15). Which gridded irradiance data is best for modelling photovoltaic power production in Germany? *Solar Energy*, 232, ss. 444-458.
- Knutsen, J. (2023, mai 18). *Stråling og solcellepaneler*. Hentet fra Universitetet i Oslo: <https://www.uio.no/studier/emner/matnat/astro/AST2000/h17/julies-blogg/Part%203A%20Satellite%20Trajectory/Str%C3%A5ling%20og%20solcellepaneler>
- Kofstad, P. K., & Pedersen, B. (2023, mai 19). *silisium*. Hentet fra Store norske leksikon: <http://snl.no/silisium>
- Lillebo, M. (2023, mai 17). *mikronett*. Hentet fra Store norske leksikon: <https://snl.no/mikronett>
- Longyearbyen lokalstyre. (2023, mai 29). *Finansiering av overgangsløsning for energiproduksjonen*. Hentet fra Longyearbyen lokalstyre: <https://www.lokalstyre.no/finansiering-av-overgangsloesning-for-energiproduksjonen.6528800-545699.html>
- Masson, G., & Kaizuka, I. (2022). *Trends in Photovoltaic Applications 2022*. The IEA Photovoltaic Power Systems Programme. International Energy Agency. Hentet fra IEA: [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/02/PVPS\\_Trend\\_Report\\_2022.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/02/PVPS_Trend_Report_2022.pdf)
- Mæhlum, L. (2023, mai 15). *solceller*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/solceller>
- Montér. (2023, mai 27). *Takkalkulator*. Hentet fra Montér: <https://www.monter.no/byggeplanlegger/takkalkulator/>
- Nord Pool Group. (2023, mai 31). *Day-ahead prices*. Hentet fra Nord Pool: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/NO/Daily/?view=table>

- Nord Pool Group. (2023, mai 31). *Intraday Market Data*. Hentet fra Nord Pool:  
<https://www.nordpoolgroup.com/en/maps/#/nordic>
- Norsk klimaservicesenter. (2023, mai 25). *Observasjoner og værstatistikk*. Hentet fra Norsk klimaservicesenter: <https://seklima.met.no/>
- NREL. (2023, mai 21). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. Hentet fra NREL:  
<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- NVE. (2019). *Sammendrag av nøkkeltallene for nettselskapene*. Hentet fra NVE:  
<https://www.nve.no/media/8899/sammendrag.pdf>
- NVE. (2023, mai 31). *Kraftproduksjon*. Hentet fra NVE:  
<https://www.nve.no/energi/energisystem/kraftproduksjon/>
- Olje- og energidepartementet. (2023, mai 21). *Strømnettet*. Hentet fra Energifakta Norge:  
<https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftnett/>
- Olomiyesan, B., Oyedum, O., Ugwuoke, P., Ezenwora, J., & Ibrahim, A. (2015). Solar Energy for Power Generation: A Review of Solar Radiation Measurement Processes and Global Solar Radiation Modelling Techniques . *Nigerian Journal of Solar Energy*, Vol. 26, ss. 58-65.
- Powered by Telemark. (2023, mai 30). *Forskningens hjemmehane*. Hentet fra Powered by Telemark: <https://stories.poweredbytelemark.no/skagerak-energilab/>
- Psomopoulos, C. I. (2015, August 1). A Comparative Evaluation of Photovoltaic Electricity Production Assessment Software (PVGIS, PVWatts and RETScreen). *Environmental Processes*, 2, ss. 175-189.
- Røros E-verk Nett as. (2023, mai 31). *Nettleiepriser over 100.000*. Hentet fra Røros E-verk Nett as: <https://revnett.no/index.php/nettlei/nettleie-fra-1-juli-over-100-000>
- Ritchie, A., & Howard, W. (2006, November 22). Recent developments and likely advances in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 162(2), ss. 809-812.

- Robson, G. (2006, April 17). *Electron shell diagram for Silicon, the 14th element in the periodic table of elements*. Hentet Mai 19, 2023 fra Wikipedia:  
[https://no.wikipedia.org/wiki/Silisium#/media/Fil:Electron\\_shell\\_014\\_Silicon.svg](https://no.wikipedia.org/wiki/Silisium#/media/Fil:Electron_shell_014_Silicon.svg)
- Rosvold, K., & Hofstad, K. (2023, mai 15). *energilagring*. Hentet fra Store norske leksikon:  
<https://snl.no/energilagring>
- Satyavani, T. V., Kumar, A. S., & Rao, P. S. (2016, Mars). Methods of synthesis and performance improvement of lithium iron phosphate for high rate Li-ion batteries: A review. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), ss. 178-188.
- Schmidt-Rohr, K. (2018, August 23). How Batteries Store and Release Energy: Explaining Basic Electrochemistry. *Journal of chemical education*, 95(10), ss. 1801-1810.
- SolarDesignGuide. (2023, mai 27). *Which Direction Should Your Solar Panels Face?* Hentet fra SolarDesignGuide: <https://solarDesignGuide.com/solar-panel-tilt-and-azimuth/>
- Solcellespesialisten AS. (2023, mai 30). *Produkter*. Hentet fra Solcellespesialisten:  
[https://www.nettbutikk.solcellespesialisten.no/produkter?Filter=PrdGruppeLev2ID%1:PrdGruppeLev2ID%1\\_53%7CPrdGruppeLev1ID%1:PrdGruppeLev1ID%1\\_8](https://www.nettbutikk.solcellespesialisten.no/produkter?Filter=PrdGruppeLev2ID%1:PrdGruppeLev2ID%1_53%7CPrdGruppeLev1ID%1:PrdGruppeLev1ID%1_8)
- Statnett. (2023, mai 31). *Forventer kraftig vekst i kraftforbruket, avhengig av nett og mer kraftproduksjon*. Hentet fra Statnett: <https://www.statnett.no/om-statnett/nyheter-og-pressemedlinger/nyhetsarkiv-2023/forventer-kraftig-vekst-i-kraftforbruket-avhengig-av-nett-og-mer-kraftproduksjon/>
- SunPower Maxeon. (2020, Juli). *SunPower Maxeon Solar Panels*. Hentet fra SunPower Maxeon: [https://sunpower.maxeon.com/int/sites/default/files/2022-06/sp\\_mst\\_MAX3-400-395-390\\_ds\\_en\\_a4\\_mc4\\_1mcable\\_536423.pdf](https://sunpower.maxeon.com/int/sites/default/files/2022-06/sp_mst_MAX3-400-395-390_ds_en_a4_mc4_1mcable_536423.pdf)
- Symeonidou, M. M., Zioga, C., & Papadopoulos, A. M. (2021, August 1). Life cycle cost optimization analysis of battery storage system for residential photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127234.
- Tesla, Inc. . (2023, mai 29). *Select Megapack*. Hentet fra Tesla:  
<https://www.tesla.com/megapack/design>

Urrejola, E., Antonanzas, J., Ayala, P., Salgado, M., Ramírez-Sagner, G., Cortés, C., . . .

Escobar, R. (2016, april 14). Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile. *Energy Conversion and Management*, 114, ss. 338-347.

