

Birgit Taugbøl Bang  
Ingrid Lykken Hamre

# Karinelund studentby som et energipositivt nabolag

Bacheloroppgave i BIFOREN  
Veileder: Jacob Lamb  
Mai 2023

NTNU  
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for energi- og prosesseteknikk



Bilde fra Studentskipnaden i Trondheim



Birgit Taugbøl Bang  
Ingrid Lykken Hamre

# **Karinelund studentby som et energipositivt nabolag**

Bacheloroppgave i BIFOREN  
Veileder: Jacob Lamb  
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for energi- og prosessteknikk



Kunnskap for en bedre verden





Institutt for energi-  
og prosesssteknikk

## Bacheloroppgave

<b>Oppgavens tittel:</b> Karineland studentby som et energipositivt nabolag <b>Project title (ENG):</b> Karineland student village as a positive energy neighbourhood	<b>Gitt dato:</b> 21. 11.2022
	<b>Innleveringsdato:</b> 22.05.2023
	<b>Antall sider rapport / sider vedlagt:</b>  105/2
<b>Gruppedeltakere:</b> Birgit Taugbøl Bang Ingrid Lykken Hamre	<b>Veileder:</b> Jacob Lamb
	<b>Prosjektnummer:</b> BIFOREN23-12
<b>Oppdragsgiver:</b>	<b>Kontaktperson hos oppdragsgiver:</b>

Fritt tilgjengelig:

Tilgjengelig etter avtale med oppdragsgiver:

Rapporten frigitt etter:

Gruppedeltakere signaturer:

*Birgit Taugbøl Bang*

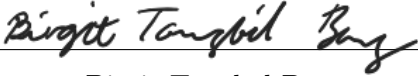
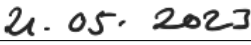
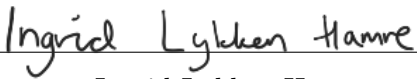
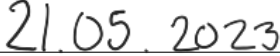
*Ingrid Lykken Hamre*

## Forord

Denne bacheloroppgaven er den avsluttende delen av det tre-årige ingeniørstudiet fornybar energi (BIFOREN) ved institutt for energi- og prosessteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven er et samarbeid mellom to studenter og har et omfang på 20 studiepoeng. Formålet med bacheloroppgaven er å anvende kunnskapen som er opparbeidet i løpet av studiet, til å identifisere, sammenstille og løse relevante problemstillinger. I denne oppgaven undersøkes produksjons- og lagringsmuligheter av energi ved Karinelund studentby i Trondheim.

Vi ønsker å takke alle som har bidratt til denne oppgaven. En særlig takk går til førsteamanuensis Jacob Lamb for veiledning underveis i arbeidet og Knut Tore Skjerve fra Studentskipnaden i Trondheim (Sit) for informasjon om studentbyen og forbruksdata fra boligene.

Gløshaugen, Trondheim

 _____ Birgit Taugbøl Bang	 _____ Dato
 _____ Ingrid Lykken Hamre	 _____ Dato

## Sammendrag

Globalt står byområder for omtrent 70 % av klimagassutslippene, og fra 1990-2019 har utslippene fra bygg doblet seg. I EU-landene, og i Norge, er bygningsmassen ansvarlig for omtrent 40 % av det totale energiforbruket og 36 % av de energirelaterte utslippene. For å få ned klimagassutslippene er det derfor helt nødvendig å redusere energibruken i bygg. På grunn av dette har energieffektivisering av bygg fått et stort fokus i utformingen av EUs klimapolitikk. Blant annet foreslår EU-kommisjonen at alle eksisterende bygg skal oppnå energimerking F innen 2030, og E innen 2033. Innen 2050 skal også hele bygningsmassen oppnå status som nullutslippsbygg. I Norge anslår NVE at det i boligbygg er potensial for å kutte energibruken med over 3 TWh ved hjelp av energieffektivisering.

Energipositive bygg vil kunne bidra til å få ned energibruken og klimagassutslippene fra bygningsmassen ved å produsere mer energi enn det som forbrukes. Dette overskuddet gjør at boligene også kan avlaste kraftnettet ved å benytte egenprodusert energi i årets toppplasttimer. Ved å etablere energipositive nabolag og oppnå plussenergi-standard på områdenivå, vil fleksibiliteten kunne bli enda større enn med enkeltbygg. I Norge begrenses denne muligheten av regelverket som tilsier at egenprodusert strøm bare kan deles bak samme AMS-måler. Høsten 2022 la Regjeringen fram et forslag til en ny plusskundeordning. Denne legger til rette for at produksjonen kan deles mellom flere boliger. Norges satsing på utbyggingen av energipositive nabolag er derfor avhengig av at den nye ordningen blir vedtatt.

80 % av dagens bygg vil fortsatt være i bruk i 2050. Disse må gjennomgå en massiv energieffektiviseringsprosess for at EUs klimamål skal nås. I denne oppgaven er det valgt å undersøke hva som skal til for at flere eksisterende bygg skal kunne oppnå status som et energipositivt nabolag. Casestudien har undersøkt potensialet for energiproduksjon og lagring for Karinelund studentby i Trondheim ved å simulere et solcelleanlegg med batterilagring i PV\*SOL. Det er også gjort beregninger for å se på effekten av å installere luft-til-luft varmepumper i boligene.

Beregningene viser at varmepumpene vil redusere nabolagets forbruk med over 50 %. Ved å i tillegg installere et FV-system på 150 kWp og benytte en batterilagringkapasitet på 316 kWh vil Karinelund studentby oppnå en selvforsyningsgrad på 40,6 % og en grad av egenkonsum på 65,6 %. Forbruket per kvadratmeter bruksareal er likevel for høyt til å kunne oppfylle kravet til nesten-nullenergibygg, og det er for lav produksjon av solkraft til å kunne dekke hele forbruket. Nabolaget vil derfor ikke kunne oppnå status som et energipositivt nabolag med løsningene presentert i denne oppgaven alene. Kombinasjonen av varmepumper, solceller og litium-ionbatterier har likevel redusert nabolagets energibehov fra kraftnettet med 327 000 kWh per år.

Til tross for oppgavens begrensninger er det vist at det er mulig å produsere solkraft på boligbygg i Trondheim, men hvorvidt dette er økonomisk gunstig må undersøkes videre. Det burde også undersøkes om det er andre tekniske løsninger som vil være mer hensiktsmessig for Karinelund studentby, og som i større grad kan bidra til at nabolaget kan bli et positivt energinabolag.

## Abstract

Globally, cities and urban areas account for 70 % of greenhouse gases, and buildings' greenhouse gas emissions have doubled from 1990-2019. In the EU and Norway, the building stock accounts for about 40 % of the total energy consumption and 36 % of energy-related emissions. As a result, it is crucial to reduce energy consumption in buildings to reduce emissions. This is one of the focus areas of the EU's climate policy. The European Commission proposes that all buildings must achieve the energy label F by 2023 and E by 2030. All existing buildings must also become zero-emission buildings by 2050. In Norway, an energy efficiency potential of more than 3 TWH in residential buildings is estimated.

By producing more energy than they consume, positive energy buildings will reduce the building stock's energy use and greenhouse gas emissions. By using self-produced energy during peak hours, this surplus energy can also relieve the power grid. The benefits of positive energy buildings can be further enhanced through the development of positive energy neighbourhoods, enabling greater flexibility. In Norway, the existing legislation which specifies that self-produced energy can only be shared within one household, restricts the establishment of positive energy neighbourhoods. Last September the Norwegian government proposed a new policy that allows the production to also be shared between multiple households. The implementation of this policy is crucial for Norway's investment in positive energy neighbourhoods.

Since 80 % of the building stock will still be in use in 2050, this report is looking into how existing residential buildings can become an positive energy neighbourhood. The case study has examined the potential for energy production and storage for Karinelund student village in Trondheim by simulating a PV system with battery storage in PV\*SOL. Calculations have also been made to see the effect of installing air-source heat pumps in each building.

The calculations show that heat pumps will reduce the neighborhood's consumption by over 50 %. By installing a PV system of 150 kWp and using a battery storage capacity of 316 kWh Karinelund student village could achieve a degree of self-sufficiency of 40.6 % and a degree of self-consumption of 65,6 % based on the reduced consumption. The consumption per square meter of heated floor area is still too high to meet the requirements of a nearly zero-energy building, and production from the PV system is insufficient to meet the demand. Because of this, Karinelund student village can not become an positive energy neighbourhood by only implementing the solutions described in this report. Nevertheless, the neighborhood's annual grid energy usage has been cut by 327,000 kWh due to the installation of heat pumps and solar panels.

Despite the limitations of the thesis, it has been demonstrated that it is possible to generate solar power on residential buildings in Trondheim, but whether this is economically beneficial must be investigated further. Further research should be done to see whether other technological options would be better suited for Karinelund Student Village and would have a bigger impact on the neighborhood's transition to a positive energy neighborhood.



# Innhold

<b>Forord</b>	<b>i</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Begrepsliste</b>	<b>vii</b>
<b>Forkortelser</b>	<b>viii</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Hensikt og problemstilling . . . . .	2
1.3 Begrensninger . . . . .	2
1.4 Struktur . . . . .	2
<b>2 Teori</b>	<b>3</b>
2.1 Bygningmassen i Europa . . . . .	3
2.1.1 Norske og Internasjonale klimamål . . . . .	3
2.2 Energikrav til bygg . . . . .	5
2.2.1 Byggteknisk forskrift . . . . .	5
2.2.2 Energimerking . . . . .	6
2.2.3 Nullenergibygge og energipositive nabolag . . . . .	7
2.3 Faktorer som påvirker energibruk i bygg . . . . .	8
2.3.1 Varmetap . . . . .	10
2.3.2 Energibalansen i bygg . . . . .	11
2.3.3 Kuldebroer . . . . .	14
2.3.4 Beboerferd . . . . .	14
2.3.5 Tiltak som kan redusere energibruken i bygg . . . . .	15
2.3.6 Enovastøtte for energi- og klimatiltak . . . . .	17
2.4 Det norske kraftnettet . . . . .	17
2.4.1 Kraftmarkedet . . . . .	18
2.4.2 Strømpriser . . . . .	18
2.4.3 Modeller for deling av overskuddsproduksjon . . . . .	20
2.5 Fleksibilitet i kraftnettet . . . . .	21
2.5.1 Forbrukerfleksibilitet . . . . .	22
2.5.2 Energilagringssystemer . . . . .	24
2.5.3 Litium-ionbatterier . . . . .	25
2.5.4 Dimensjonering av batterisystem for lagring av solkraft . . . . .	27
2.6 Varmepumper . . . . .	30
2.6.1 Effektfaktor . . . . .	30
2.6.2 Carnotsyklusen . . . . .	31
2.6.3 Varmepumpesyklus . . . . .	33
2.7 Solenergi . . . . .	35
2.7.1 Solkraft i Norge . . . . .	36
2.7.2 Solinnstråling . . . . .	36
2.7.3 Solcellers oppbygging og virkemåte . . . . .	39
2.7.4 Ulike typer solceller . . . . .	40
2.7.5 Faktorer som påvirker årlig produksjon fra solceller . . . . .	42
2.7.6 Fra celle til anlegg . . . . .	43

2.7.7	Barrierer mot solkraft . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Casestudie - Karinelund</b>	<b>45</b>
3.1	Systembeskrivelse . . . . .	45
3.1.1	Boligene . . . . .	45
3.1.2	Energiforbruk . . . . .	48
3.2	Varmepumpeberegning . . . . .	50
3.2.1	Antagelser . . . . .	50
3.2.2	Valg av varmpumpe . . . . .	50
3.2.3	Klimadata . . . . .	51
3.2.4	Matlab-beregning . . . . .	51
3.2.5	Resultater fra varmpumpeberegning i Matlab . . . . .	52
3.3	Beregning av solenergipotensiale . . . . .	53
3.3.1	Klimadata og systemtype . . . . .	54
3.3.2	3D-modellering . . . . .	55
3.3.3	Solcellepaneler . . . . .	56
3.3.4	Vekselrettere og kabling . . . . .	57
3.3.5	Batteridimensjonering . . . . .	57
3.4	Simulering av Karinelund studentby med ulike scenarier . . . . .	59
3.5	Resultater fra simulering PV*SOL . . . . .	59
3.5.1	Scenario 1 . . . . .	59
3.5.2	Scenario 2 . . . . .	60
3.5.3	Scenario 3 . . . . .	62
3.5.4	Ulikheter mellom scenarioene . . . . .	63
3.6	Økonomiske kostnader . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>66</b>
4.1	Bygningskroppen . . . . .	66
4.1.1	Yttervegger og vinduer . . . . .	66
4.2	Energiforbruk . . . . .	67
4.2.1	Forbruket på Karinelund i forhold til landsgjennomsnittet . . . . .	67
4.2.2	Beboeratferd . . . . .	68
4.2.3	Passiv soloppvarming . . . . .	68
4.2.4	Energibesparende tiltak . . . . .	69
4.3	Resultater fra varmpumpeberegningen . . . . .	69
4.3.1	Konsekvensen av interpolasjon og ekstrapolasjon . . . . .	69
4.3.2	Antall innedeler . . . . .	70
4.3.3	COP og installert effekt . . . . .	70
4.3.4	Romoppvarmingsandel . . . . .	70
4.3.5	Temperaturer . . . . .	71
4.4	Solberegninger . . . . .	72
4.4.1	Effekten av skygge . . . . .	72
4.4.2	Plusskunde . . . . .	73
4.4.3	Modellering av FV-systemet . . . . .	74
4.4.4	Valg av panel og inverter . . . . .	75
4.4.5	Tap fra tilsmussing . . . . .	75
4.4.6	CO <sub>2</sub> -besparelser . . . . .	76
4.4.7	Valg av batteri . . . . .	76
4.4.8	Batteridimensjonering . . . . .	76
4.5	I forhold til nZEB og PEN . . . . .	78
4.6	Kostnader . . . . .	78
4.7	Videre arbeid . . . . .	79

5	Konklusjon	80
A	Vedlegg: Varmepumpeberegning i MATLAB	I

# Begrepsliste

Adiabatisk prosess	En prosess uten energiutveksling med omgivelsene.
Båndgap	Fysisk størrelse som sier noe om hvilke energier elektroner i et materiale kan ha.
Duggpunktstemperatur	Den temperaturen en gassmengde må avkjøles til, uten at trykket og dampinnholdet endres, for at den skal bli mettet.
Edelgass	Grunnstoffer hvor det ytterste elektronskallet er fylt opp.
Emmisivitet	Et legemes strålingsevne.
EUs taksnomi	Et klassifiseringssystem for økonomisk aktivitet utarbeidet av Den europeiske union.
Isoterm prosess	En prosess som foregår ved konstant temperatur.
Gesimshøyde	en bygnings høyde målt fra terreng opp til skjæringslinjen mellom fasade og tak.
Jevons paradoks	En økonomisk teori om at teknologiske fremskritt som øker effektiviteten i bruken av en ressurs har tendens til å øke forbruket av ressursen.
Kalenderdegradering	Degradering av batterier som følge av tid.
Konsesjon	Norsk lovgivning krever spesiell tillatelse med vilkår – konsesjon – før bygging av kraftanlegg ut over en viss størrelse kan settes i gang.
Kuldeperioden	Perioden med så lave utetemperaturer at det er nødvendig med oppvarming innendørs.
Livsløpsanalyse	Analyse av produkters livsløp gjennomføres for å evaluere miljømessige konsekvenser knyttet til et produkt, et produktsystem eller en aktivitet.
Luftskifte	Luftskiftet oppgis som oftest ved et tall fra 0-1 og er et mål på hvor god ventilasjonen er.
Montrealprotokollen	En internasjonal traktat inngått i 1987 for å beskytte ozonlaget ved å fase ut produksjonen av skadelige gasser.
Parisavtalen	En internasjonal klimaavtale som ble vedtatt den 12. desember 2015 på FNs klimakonferanse 2015 i Paris.
Passivhus	Hus som har langt lavere energibehov enn vanlige hus, på grunn av en rekke passive tiltak for å redusere behovet.
Peak-shaving	Flytting av effektforbruk fra tider på døgnet når forbruket er høyt, til tider på døgnet når forbruket er lavere.
Primærbatteri	Batterier som kan brukes en gang.
Primærenergi	En betegnelse på de forskjellige energiformene slik de forefinnes i naturen, før de har gjennomgått noen form for energiomforming.
Prosumert	En kunde som både produserer og konsumerer elektrisk kraft.
Sekundærbatteri	Batterier som kan brukes flere ganger.
Sintef	Et norsk forskningsinstitutt, organisert som en frittstående allmennyttig stiftelse.
Spisslast	En betegnelse på det maksimale effektforbruket (energiforbruket per tidsenhet) som inntreier i løpet av et døgn eller et år. (Kalles også topplast)
Syklusaldring	Degradering av batterier som følge av opp- og utlading.

Syklusliv	Hvor mange ladesykluser et batteri tåler.
Urbanisering	En prosess der befolkning, markeder og tjenester forflyttes fra landsbygd til byområder
Valenselektron	Elektronene i det ytterste elektronskallet på et atom.
Vårknipa	Perioden på slutten av vinteren når det er for lite kraftproduksjon til å dekke forbruket
Økodesignforordning	Forordning som skal sikre at produkter bidrar til bærekraft ved å blant annet designes for å vare lenger, kan gjenbrukes og er resirkulerbare.

## Forkortelser

AC	Alternating current (Vekselstrøm)
AMS	Avanserte måle- og styringssystemer
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology (Miljøsertifisering for bygg)
COP	Coefficient of performance (Effektfaktor)
DC	Direct current (Likestrøm)
DiBK	Direktoratet for byggkvalitet
DKK	Danske kroner
DNV	Det Norske Veritas
DoD	Depth of discharge (Utladingsnivå)
ECEEE	European Council for an Energy Efficient Economy
EPBD	Energy performance of Buildings Directive (Direktiv for bygningers energiytelse)
EU	Den europeiske union
EØS	Det europeiske økonomiske samarbeidsområde
FN	De forente nasjoner
FoL	Forskrift om leveringskvalitet
FV	Fotovoltaisk
KDD	Kommunal- og distriktsdepartementet
KFK	Kloroflurkarbon
LFP	Lithium iron phosphate (Litiumjernfosfat)
LIB	Litium-ionbatteri

NCA	Nickel cobalt aluminium (Nikkel kobolt aluminium)
NMC	Nickel manganese cobalt (Nikkel mangan kobolt)
NOK	Norske kroner
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
nZEB	nearly zero energy/emission building (nesten-nullutslippsbygg/nesten-nullenergibygge)
OED	Olje og energidepartementet
PBL	Plan og bygningsloven
PEB	Positive energy building (Plusshus)
PR	Performance ratio (Ytelsesfaktor)
RME	Reguleringsmyndigheten for energi
SC	Scenario
SCOP	Seasonal coefficient of performance (Årsvarmefaktor)
SEI	Solid electrolyte interphase (fast elektrolytt-interfase)
SIFO	Forbruksforskningsinstituttet
Sit	Studentskipnaden i Trondheim
SoC	State of charge (Batterinivå)
SoH	State of health (Batterihelse)
SPEN	Sustainable positive energy neighbourhood (Bærekraftige plussenerginabolag)
SSB	Statistisk sentralbyrå
TEK	Byggeteknisk forskrift
ZEB	Zero energy building/ Zero emission building (Nullenergibygge/Nullutslippsbygg)

## Figurer

2.1	FNs bærekraftsmål. Hentet fra [22]	4
2.2	Faktorer som påvirker energibruk i bygg.	8
2.3	Fordeling av strømforbruk i husholdninger. Basert på [54, 58]	9
2.4	Varmetap gjennom en sammensatt vegg. Hentet fra [61]	13
2.5	Beregning av total termisk motstand. Basert på [65]	13
2.6	Det norske kraftnettet. Hentet fra [100].	18
2.7	Graf for prissetting av strøm. Hentet fra [105]	19
2.8	Illustrasjon av nåværende ordning for deling av overskuddsproduksjon (t.v) og forslag til ny ordning (t.h). Hentet fra [113].	21
2.9	Lastprofiler i Norge. Hentet fra [115].	22
2.10	Peak-Shaving med batteri. Basert på [119].	23
2.11	Energilagringssystemer. Basert på [121].	24
2.12	Litiumionbatteri. Hentet fra [122].	26
2.13	Oversikt over daglig nettolast, nettoproduksjon og absolutt egenforbruk i et bygg med solceller. Basert på [133].	28
2.14	Energimatchingsdiagram. Basert på [132].	28
2.15	Grad av egenkonsum og selvforsyning avhengig av størrelse på batterilager og FV-system normalisert til årlig forbruk i MWh. Basert på [134].	29
2.16	Termodynamikkens 2. lov. Hentet fra [144].	31
2.17	Carnotsyklusen. Hentet fra [147].	32
2.18	Varmepumpesyklusen. Basert på [151].	33
2.19	Solkraftsproduksjon i Norge fra år 2020-2022. Hentet fra [112].	35
2.20	Utviklingen av solcelleteknologi. Data hentet fra [158] og [157].	36
2.21	Ulike typer solinnstråling. Basert på [162].	37
2.22	Solens posisjon i forhold til jordens overflate. Basert på [163].	37
2.23	Helningen til solcellepaneler. Hentet fra [163].	37
2.24	Definisjonen på AM (air mass). Basert på [163].	39
2.25	P-type og n-type halvleder. Basert på [167].	40
2.26	Oppbyggingen av en solcelle. Hentet fra [173].	41
3.1	Karinelund Studentby. Hentet fra [187].	45
3.2	Tegning av bolig 149. Oppgitt av Sit.	46
3.3	Veggkonstruksjon.	47
3.4	Kart over fjernvarmeledninger ved Karinelund. Hentet fra [194].	49
3.5	Årsforbruk for hvert hus.	49
3.6	Resultater fra spørreundersøkelse.	50
3.7	Endring i studentbyens månedsforbruk med og uten varmepumpe.	53
3.8	System benyttet i scenario 2. Hentet fra PV*SOL.	56
3.9	Utforming av system uten (t.v) og med (t.h) skygge fra trær. Hentet fra PV*SOL.	59
3.10	Forskjell i produksjon og forbruk per måned for SC1 og SC2.	60

3.11 Innmating for SC1. Hentet fra PV*SOL. . . . .	60
3.12 Differanse i energiproduksjon per takflate med og uten skygge. . . . .	61
3.13 Innmating til kraftnettet for SC2. Hentet fra PV*SOL. . . . .	61
3.14 Forbruk og produksjon for SC3a og SC3b. . . . .	62
3.15 Innmating til kraftnettet for SC3a. Hentet fra PV*SOL. . . . .	62
3.16 Innmating til kraftnettet for SC3b. Hentet fra PV*SOL. . . . .	63
3.17 Energifyttdiagram for SC3a. Basert på figur fra PV*SOL. . . . .	64



## Tabeller

2.1	Minstekrav til U-verdi fra forskjellige byggeforskrifter. Hentet fra [34, 35, 33] . . .	6
2.2	Gjennomsnittlig strømforbruk i norske leiligheter . . . . .	9
2.3	Egenskaper til Litium-ionbatterier med ulike katodematerialer. (Hentet fra [125])	26
2.4	Solinnstrålingsvinkler. (Hentet fra [163]) . . . . .	38
3.1	Mål på bygg . . . . .	47
3.2	Materialene i ytterveggen med tilhørende termisk konduktivitet og resistanser. (Hentet fra [61, 191, 192]) . . . . .	48
3.3	COP og effekt varmepumpe. (Hentet fra [198, 199]) . . . . .	51
3.4	Resultater fra varmepumpeberegning . . . . .	52
3.5	Egenskaper Longi solar LR5-54HPB 400 M. (Hentet fra [205, 204]) . . . . .	56
3.6	Test av ulikt antall XOLTA-batterier . . . . .	58
3.7	Tap med ulikt antall XOLTA-batterier . . . . .	58
3.8	Sammenligning av ulike scenarioer . . . . .	63
3.9	Energimatching . . . . .	64
3.10	Pris for solcelleanlegget . . . . .	65

# 1 Innledning

Denne seksjonen vil beskrive bakgrunnen for prosjektet og oppgavens hensikt og problemstilling. Deretter vil det informeres om hvilke begrensninger som ligger til grunn, og hvordan oppgaven er strukturert.

## 1.1 Bakgrunn

I mars i år la FN's klimapanel frem siste del av den sjette hovedrapporten *IPCC Sixth Assessment Report (AR6)*. I den slås det fast at valgene som tas de neste ti årene vil påvirke kloden i tusenvis av år fremover, og at mulighetene for å snu trenden med økende temperaturer stadig blir færre [1].

Andelen globale utslipp som skjer i tilknytning til byområder er på omtrent 70 %, og øker stadig. Samtidig legger urbanisering til rette for mer effektiv ressursutnyttelse, og mange byer har et mål om å bli nullutslippsbyer [2]. En betydelig kilde til utslipp er bygg. Globalt har utslippene fra boligbygg doblet seg fra 1990-2019 [3]. I fastlands-Norge står bygningsmassen for mer enn en tredjedel av samlet energibruk, og over halvparten av all elektrisitetsbruk i følge statistisk sentralbyrå (SSB) [4]. Utviklingen av nullutslippsbygg er derfor et viktig steg mot å oppnå byområder med netto nullutslipp, og motarbeide klimaendringene. For å få til dette er det flere tiltak som må implementeres. Blant annet utnyttelsen av fornybare energikilder til oppvarming og annet elektrisk utstyr. EU estimerer at en stor del av den økende produksjonen fra fornybare kilder vil være lokal i fremtiden. I rapporten *Clean energy for all Europeans* estimeres det at lokale energisamfunn vil eie 21 % av kapasiteten fra solceller innen 2030, og at rundt halvparten av husholdningene i EU vil produsere fornybar energi innen 2050 [5].

Mellom 2010-2019 har både solenergi og prisen på litiumbatterier blitt 85 % billigere [6]. Norsk solkraft hadde et rekordår i 2022. I løpet av året ble det installert 149 MW tilknyttet nettet, noe som resulterer i en dobling fra året før [7]. Likevel ligger Norge fire-fem år bak sammenlignbare land som Sverige og Danmark. I Norge er det stort sett takmonterte solceller som installeres som følge av blant annet høyere strømpriser og et ønske om å være selvforsynt med strøm. Med den økte etterspørselen og ventetider på opptil et halvt år lønner det seg å være tidlig ute med å vurdere mulighetene for installasjon på sitt bygg [8].

Økt elektrifisering i samfunnet fører til høyere effekttopper og en reduksjon av spenningen ved tilkoblingspunktet. På samme måte kan innmating fra solcelleproduksjon gi økt spenning [9]. Dette kan føre til at nettselskapene ikke klarer å levere energi med spenningskvalitet i henhold til Forskriften om leveringskvalitet (FoL). Dette kan føre til at elektrisk utstyr blir ødelagt [10]. Nødvendige oppgraderinger av det norske kraftnettet kan koste mer enn 10 milliarder kroner [9]. For å minske presset på kraftnettet burde det legges til rette for at flere sluttbrukere kan bruke mer av strømmen de produserer selv, og det jobbes for å utvikle byområder som produserer mer energi enn det som forbrukes i området.

## 1.2 Hensikt og problemstilling

Temaet for dette bachelorprosjektet er positive energiblokker. Prosjektet skal analysere metoder for å redusere belastningen på kraftnettet. Oppgaven vil fokusere på hvordan energiproduksjon og lagring kan optimaliseres for Karinelund studentby i Trondheim. Hensikten med oppgaven er å undersøke hvordan Karinelund studentby kan bli et energipositivt nabolag og besvare følgende problemstilling:

”Hvordan kan eksisterende bygg bli energipositive og avlaste strømmettet ved å produsere strøm til eget forbruk, hvor overskuddsstrømmen enten deles, lagres eller sendes til distribusjonsnettet?”

## 1.3 Begrensninger

Bacheloroppgaven har ingen ekstern oppdragsgiver. Oppgaven er derfor utarbeidet av gruppen selv med innspill fra intern veileder. Det er valgt å fokusere på et reelt nabolag, da eldre boliger bidrar betydelig til energibruken og klimagassutslippene i bygningsmassen. Det å velge et bygg som allerede eksisterer ga også arbeidet med oppgaven en mer praktisk tilnærming. Siden oppgaven ikke er etterspurt av en ekstern kilde har det vært noe utfordrende å skaffe nødvendig data. Dette har gjort at gruppen har vært nødt til å ta en del antagelser. Fokuset i denne oppgaven har vært å undersøke om det er teoretisk mulig at nabolaget kan bli et positivt energinabolag. Det er derfor ikke tatt hensyn til økonomisk gunstighet, men dette må undersøkes dersom det blir aktuelt å gjennomføre en energioppgradering av boligene i fremtiden.

## 1.4 Struktur

Rapporten er delt inn i fem hoveddeler:

Kapittel 2: Teori - Denne delen inneholder teori om ulike teknologier og regelverk basert på læringsmaterieell som har vært brukt i emnene på studiet, og litteraturstudier.

Kapittel 3: Casestudie - Denne delen inneholder en systembeskrivelse av Karinelund studentby, hvilke metoder og antagelser som er brukt i beregningene og resultatene fra beregningene.

Kapittel 4: Diskusjon - Denne delen diskuterer funnene fra kapittel 4, og forslag til forbedring av beregningene.

Kapittel 5: Konklusjon - Denne delen konkluderer med om det er teknisk mulig at Karinelund studentby kan bli oppgradert til et positivt energinabolag.

## 2 Teori

Denne seksjonen er en litteraturstudie og presenterer relevant bakgrunnsstoff som er nødvendig for å gjennomføre beregninger i Kapittel 3. Det første temaet som presenteres er energibruk i bygg og hvilke klimamål og energikrav som er gjeldene. Videre presenteres det hvordan energilagringssystemer kan bidra til å oppnå fleksibilitet i kraftnettet. Lagringsløsningen som det er fokusert på er litium-ionbatterier. Det blir også presentert teori om varmpumper og solkraft i Norge ved hjelp av solceller.

### 2.1 Bygningmassen i Europa

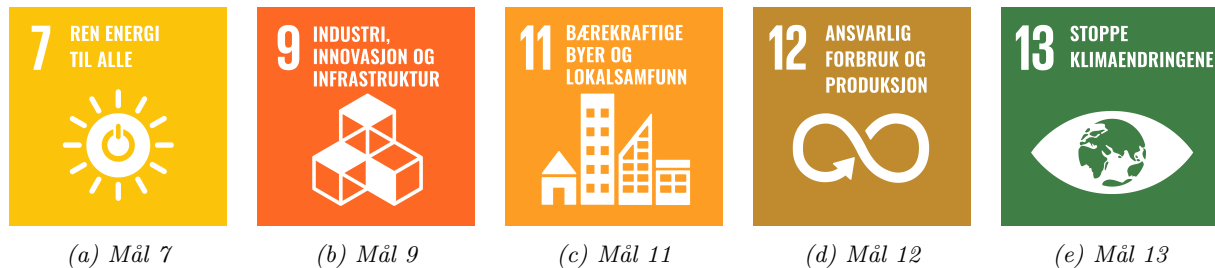
Bygningmassen er ansvarlig for omtrent 40 % av det totale energiforbruket, og 36 % av energirelaterte klimagassutslipp i EU [11]. Disse tallene er også gjeldende for Norge [12]. For å kunne gjennomføre det grønne skiftet er det derfor helt nødvendig å undersøke hvordan utslippene fra byggenæringen og boliger generelt kan reduseres. En stor del av utslippene i byggenæringen er knyttet til materialproduksjon, bygging av nye bygg og riving av gamle bygg. Det kan derfor påstås at den mest klimavennlige kvadratmeteren er den som ikke bygges [13]. Omtrent 80 % av dagens bygg vil fortsatt være i bruk i 2050. Disse har stort behov for energioppgradering da tre fjerdedeler av bygningmassen er energi-ineffektiv. Likevel er den årlige oppgraderingsraten i Norge på såvidt 1 % [14]. Data fra SSB sier at det per 2023 er 4 308 490 bygg i Norge, hvorav 1 592 339 er boligbygg [15]. Regjeringen har et mål om å redusere energibruken i eksisterende bygg med 10 TWh innen år 2030, og for å oppnå dette er det helt nødvendig at oppgraderingsraten økes. Potensialet for energieffektivisering i småhus og boligblokker, som denne oppgaven vil fokusere på, er i følge NVE på litt over 3 TWh [16, 17].

#### 2.1.1 Norske og Internasjonale klimamål

Norsk klimapolitikk er sterkt knyttet til EUs klimapolitikk. Både EU og Norge forpliktet seg gjennom Parisavtalen i 2015 til å redusere klimagassutslippene med 40 % innen 2030 sammenlignet med 1990-nivået. I senere tid har både EU og Norge forhøyet målet til å innebære en reduksjon på 55 % [18]. I 2021 la EU frem klimapakken *Fit for 55* med en strategi for å nå de nye målene. *Fit for 55* er det første leddet i EUs plan om å bli verdens første klimanøytrale kontinent innen 2050 som går under navnet *The European Green Deal* [19].

Energieffektivisering av bygg er et av fokusområdene i *Fit for 55*, og klimapakken stiller strengere krav til bruk av fornybar energi og etablering av nullutslippsbygg [20]. Alle medlemsnasjonene i EU, inkludert Norge, må lage en handlingsplan for rehabilitering av bygningmassen slik at alle bygg kan oppnå status som nullutslippsbygg innen 2050. I løpet av 2023 vil EU-kommisjonen etablere et frivillig rehabiliteringspass som skal tilby huseiere en trinnvis guide for renovasjon av eksisterende bygg. Innen utgangen av 2024 må Norge ha utviklet nasjonale ordninger for dette rehabiliteringspasset. I det nye direktivet for bygningers energiytelse (EPBD), foreslår EU-kommisjonen også at alle eksisterende boligbygg skal oppnå energimerking F innen 2030, og E innen 2033 [21]. Konseptet energimerking er forklart grundigere i Kapittel 2.2.2.

Mange av de norske og europeiske klimamålene har bakgrunn i FN's bærekraftsmål. Bærekraftsmålene ble vedtatt i 2016 og består av 17 mål og 169 delmål som skal fungere som en felles global retningslinje for land, næringsliv og sivilsamfunn [22]. Av de 17 hovedmålene er det særlig fem som kan knyttes til energieffektive og miljøvennlige bygg, også kalt *grønne bygg*, som vist i Figur 2.1.



Figur 2.1: FNs bærekraftsmål. Hentet fra [22]

### Mål 7 - Ren energi til alle

Den billigste energien er den som ikke brukes, og med tanke på hvor stor andel av det totale energiforbruket som knyttes til bygg kan energieffektivisering av boliger og næringsbygg bidra til betydelige kostnadsreduksjoner. Installasjon av solceller eller utnyttelse av andre fornybare energikilder i bygg vil være viktig for å oppnå hovedmål 7. En kombinasjon av energieffektivisering og mer bruk av fornybar energi vil også kunne forbedre energisikkerheten ved å avlaste kraftnettet [23].

### Mål 9 - Industri, innovasjon og infrastruktur

Bygg og anlegg er en av de største næringene i Norge [24]. Energieffektive bygg, nullustlippsbygg og energipositive bygg kan bidra til innovasjon og nytenkning i bransjen som er nødvendig for å nå de andre hovedmålene [23].

### Mål 11 - Bærekraftige byer og samfunn

Verden urbaniseres i rekordfart, og byområder står for omtrent 70 % av klimagassutslippene [2]. Samtidig kan urbanisering legge til rette for mer effektiv ressursbruk ved at mindre områder kan produsere og lagre sin egen energi. Folk bruker mesteparten av tiden sin i bygg, og klimavennlige, energieffektive boliger er det første leddet i å oppnå bærekraftige byer [23].

### Mål 12 - Ansvarlig forbruk og produksjon

Produksjon av byggematerialer, byggeprosessen og riving av gamle bygg genererer store mengder avfall. I følge SSB utgjorde avfall fra byggebransjen 1,9 millioner tonn i 2017 [14]. I følge en rapport utført av Asplan Viak i samarbeid med NHP-nettverket (nasjonal handlingsplan for bygg- og anleggsavfall) vil bygningsmaterialer som gjenbrukes spare miljøet for 94 % av klimagassutslippene sammenliknet med nyproduserte materialer per tonn [13].

### Mål 13 - Stoppe klimaendringene

Siden bygg er ansvarlig for over 30 % av energirelaterte klimagassutslipp vil det ikke være mulig å stoppe klimakrisen uten å få ned klimagassutslippene i bygningsmassen. Ved å benytte fornybar energi i bygg i større grad, energieffektivisere boliger og gjenbruke byggematerialer vil

byggenæringens karbonfotavtrykk reduseres [23].

## 2.2 Energikrav til bygg

I tillegg til krav til blant annet brannsikkerhet, vanninstallasjoner og konstruksjonsstyrke stilles det også krav til energibruken i bygg. Disse omhandler hvor mye energi et bygg skal ha behov for og hva slags energi som skal benyttes til oppvarming. For å minimere varmetapet i bygget stilles det blant annet krav til hvor energieffektive vinduer skal være, hvor tykk isolasjon det skal være i gulv, vegger og tak, og hvor tett bygningskroppen skal være. For næringsbygg kan det også stilles krav til at ventilasjon skrur av på natten, og at det benyttes energieffektiv belysning [25].

Myndighetene har pålagt energikrav til bygg siden 1949. Disse reglene bestemmes av Kommunal- og distriktsdepartementet (KDD), og følges opp av Direktoratet for byggkvalitet (DiBK). DiBK fungerer som et nasjonalt kunnskapssenter og skal sikre miljøvennlige og tilgjengelige boliger og bygg, samt forutsigbare regler for effektiv ressursbruk i byggeprosessen. Enova er et statlig foretak som jobber for å få ny energi- og klimateknologi ut på markedet ved å tilby rådgivning og økonomisk støtte til privatpersoner og bedrifter. Enova er også ansvarlig for energimerking av boliger. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har ansvar for å følge opp EUs økodesign- og energimerkingsdirektiv [26].

I tillegg til statlige energikrav eksisterer det også flere nasjonale og internasjonale systemer for miljøsertifisering av bygg. Den første og mest etablerte av disse er BREEAM som ble lansert i 1990 av Building Research Establishment i Storbritannia. BREEAM-NOR er den nasjonale tilpasningen av sertifiseringssystemet, og et bygg oppført etter disse kravene har kvaliteter utover det som er minstekravet i den statlige byggeforskriften. Sertifiseringen har fem nivåer: *Pass*, *Good*, *Very Good*, *Excellent* og *Outstanding*. For hvert nivå øker bærekraftsnivået i bygget [27].

Det finnes også konsepter som nullutslippshus og passivhus som i utgangspunktet fokuserer på henholdsvis klimagassutslipp og termisk komfort. Et nullutslippsbygg skal produsere nok fornybar energi til å kompensere for byggets totale klimagassutslipp gjennom hele levetiden. For å få til dette må energiproduksjonen til enhver tid være tilpasset forbruket for å holde import og eksport av energi så lav som mulig [28]. Kravene til nullutslippshus i Norge er utarbeidet av ZEB-senteret som organiseres av NTNU og Sintef [28]. Passivhusstandarden er et tysk konsept som oppsto i 1988 og går ut på å oppnå et komfortabelt inneklima gjennom passive energisparingstiltak som ekstra varmeisolasjon, ekstra god tetthet, kuldebrofritt design, oppvarming gjennom optimalisert solinnstråling, superisolerte vinduer og balansert ventilasjon [29, 30]. De norske kravene for passivhus er beskrevet i norsk standard *NS 3700:2013* fra 2013 [31].

### 2.2.1 Byggteknisk forskrift

Forskrift om tekniske krav i byggverk (TEK) tilhører Plan- og bygningsloven (PBL) som utarbeides av KDD. Forskriften angir minimumskravene til ulike egenskaper et bygg må ha

Tabell 2.1: Minstekrav til U-verdi fra forskjellige byggeforskrifter. Hentet fra [34, 35, 33]

Standard	Bygningsdel	U-verdi	Kommentar
Passivhus	Fasader	0,15	
	Vindu	0,8	
TEK- 17	Fasader	0,22	alternativt 0,18
	Vindu	1,2	alternativt 0,8
TEK-87	Fasader	0,30	
	Vindu	2,4	
TEK-85	Fasader	0,45	
	Fasader i småhus	0,35	alternativ 1
		0,25	alternativ 2
	Vindu i småhus	2,1	alternativ 1
2,7		alternativ 2	

for å kunne oppføres lovlig i Norge. Forskriftene har blitt oppdatert kontinuerlig oppgjennom årene. Den første ble innført i 1969 under navnet Byggeforskrift 1969, deretter kom det en ny forskrift i 1985 og 1987. I 1997 endret forskriften navn til TEK, og det kom ny TEK i 2010 og 2017. Per 2023 gjelder den byggt tekniske forskriften fra 2017, TEK-17 [32].

Kapittel 14 i TEK-17 angir kravene til energibruken i bygg. Generelt skal bygg prosjekteres og utføres slik at det tilrettelegger for forsvarlig energibruk. Energikravene gjelder bare for byggets oppvarmede bruksareal (BRA). Kravet til energieffektivitet for småhus er at totalt energibehov i løpet av et år ikke må overstige 100 kWh per kvadratmeter, pluss et tillegg på 1600 kWh dividert på antall kvadratmeter. U-verdier er en sentral del av energikravene i TEK [33]. U-verdien angir hvor raskt varmen fra innsiden av bygget går gjennom vegger, tak og gulv, og skal beregnes som gjennomsnitt for hver av bygningsdelene. En lav U-verdi tilsier at bygningsdelen er godt isolert, mens en høy U-verdi tilsier at isolasjonsevnen er dårligere slik at varmetapet blir større. Kravene til U-verdier for ulike bygningsdeler er angitt i Tabell 2.1. For sammenligning er også kravene i passivhusstandarden inkludert i tabellen. Som et alternativ til å oppfylle kravet om totalt energibehov i TEK-17 kan boligen også oppfylle energikravene ved å ha fasader og vinduer med U-verdi på henholdsvis 0,18 W/m<sup>2</sup>K og 0,8 W/m<sup>2</sup>K. Bygget skal i begge tilfeller oppfylle minstekravet. I TEK-85 er det et generelt krav for U-verdiene til byggets fasader, mens kravene for småhus er langt lavere. I denne forskriften var det også mulig å oppfylle kravene ved to ulike kombinasjoner av U-verdi for vegg og vindu [34].

### 2.2.2 Energimerking

Energimerkeordningen er en felles europeisk merkeordning som viser produkter sitt årlig energibruk slik at forbrukere kan velge det mest energieffektive produktet [36]. I Norge har NVE ansvar for å følge opp energimerkeordningen. Skalaen går fra A-G, hvor A er best og G er dårligst [37]. Energimerking brukes også på boliger, dette har Enova ansvar for. Alle boliger over 50 m<sup>2</sup> som skal leies ut eller selges må være merket. Energimerket beskriver energieffektivitet, hvilke energikilder som benyttes i bygget og sier noe om oppvarmingsutgiftene er høye eller lave. Merket består av en energikarakter som går fra A-G, og en oppvarmingskarakter som enten er

grønn, gul eller rød. Energikarakteren angir energistandarden og forventet forbruk av energi. Et bygg med karakter A eller B er på standard med passivhus eller lavenergibygge. Med andre ord vil alle bygge som har strengere krav enn dagens TEK oppnå karakter A eller B. Bygge med karakter C oppfyller de nyeste TEK-kravene. Bygge som oppfyller eldre TEK-krav men som har et effektivt oppvarmingsystem kan også oppnå karakter C. Bygge som er oppført i tråd med forskriftskrav som er eldre enn dagens forskrift vil få karakter D-G. Den dårligste karakteren gis til eldre hus som ikke har gjennomgått noen form for energioppgraderinger. Grønn oppvarmingskarakter gis til bygge som har vannbåren oppvarming basert på biobrensel. Gul oppvarmingskarakter gis til bygge som har luft-til-luft varmepumpe, eller lukket vedovn, i tillegg til direkte elektrisk oppvarming. Bygge som bare har elektrisk oppvarming eller oljefyr havner nederst på skalaen, og får oppvarmingskarakter rød [38].

### 2.2.3 Nullenergibygge og energipositive nabolag

I EPBD fra 2010 ble det bestemt at alle nybygge måtte oppfylle krav til nesten-nullenergibygge (nZEB) fra og med 2021 [39]. Likevel ble ikke dette direktivet innlemmet i EØS-avtalen før i 2022. Medlemsstatene må selv fastslå en nasjonal definisjon av hva som menes med nZEB, og først i januar i år la KDD fram en veiledning for nesten-nullenergibygge. Denne definerer nullenergibygge som: ”Bygge med svært høy energiytelse hvor det gjenværende lave primærenergi behovet dekkes fullstendig av fornybar energi produsert på bygget, fra lokale fornybarsamfunn eller med lokal energi fra et fjernvarme- og kjøleanlegg” [40]. Dersom det ikke er lokale fornybarsamfunn eller fjernvarmeanlegg tilgjengelig åpnes det for at nullenergibygge kan benytte strøm fra kraftnettet.

Kravet til totalt netto energibehov for eneboliger og andre småhus er 86 kWh/m<sup>2</sup> per år pluss et tillegg på 1600 kWh dividert på antall m<sup>2</sup> [41, 42]. I motsetning til nZEB-definisjonen i de fleste andre land differensierer ikke den norske definisjonen mellom energikilder. Primærenergifaktoren for eksempelvis oppvarming med panelovner og fjernvarme er begge satt til 1, selv om fjernvarme anses som mer klimavennlig og energieffektivt. Begrunnelsen er at energibruken i norske bygge hovedsaklig er fornybar energi fra vannkraft og vindkraft. Primærenergi bruk er sluttforbruk av energi pluss effektivitetstapene fra omformingen av primærenergi, for eksempel naturgass, til sekundærenergi, for eksempel elektrisitet. Et sluttbruk basert på fossil energi har høyere primærenergiforbruk enn et sluttbruk basert på fornybar energi. En økning av fornybar energi gjør dermed at primærenergi behovet synker, selv om sluttforbruket forblir det samme. I EU settes primærenergifaktoren for elektrisitet lik 2,1. Ved at kravene til nullenergibygge baseres på primærenergi vil det være lettere å møte kravene for bygge i EU etterhvert som andelen av fornybar energi økes, enn det er å oppfylle kravene i Norge der primærenergifaktoren allerede er satt til 1 [43].

EUs taksonomi krever at alle nybygge må ha et energibehov som er 10 % lavere enn nZEB [44]. For renovasjon av eksisterende bygge må man følge EU-kravene til en såkalt *major renovation*, eller redusere byggets primærenergi behov med 30 % [45]. Den norske definisjonen på *major renovation* er dyp rehabilitering eller totalrehabilitering, og innebærer at bygget gjennomgår en rehabilitering som før 1.januar 2030 endrer bygget til et nesten-nullenergibygge og fra 1.januar



2030 endrer bygget til et nullutslippsbygg.

For å oppnå enda mer energieffektive bygninger er det satt i gang flere prosjekter innad i EU som jobber med energipositive bygg (PEB) som et skritt videre fra nullenergibygg. Tre slike initiativer er *Cultural-E*, *EXCESS* og *syn.ikia*. I følge deres definisjon er PEB et energieffektivt bygg som produserer mer energi fra fornybare kilder enn hva det forbruker over et år [46]. *Syn.ikia*, som koordineres av NTNU, har som oppdrag å realisere fire bærekraftige plussenerginabolag (SPEN) i forskjellige klimasoner. Et SPEN er i følge *syn.ikia* en gruppe sammenkoblede bygg med tilhørende infrastruktur innenfor et geografisk område eller virtuell grense. Hovedkonseptet er å oppnå et årlig energibehov som er lavere enn årlig fornybar energiproduksjon samtidig som det er et høyt fokus på inneklima, kostnadseffektivitet og brukervennlighet [47].

Byggene i SPEN skal oppnå 100 % energibesparelse, 90 % økning i produksjon av fornybar energi, 100 % reduksjon av klimagasser og 10 % reduksjon i livssyklus kostnader sammenlignet med nZEB. Prosjektets hovedmål er å vise at det gir flere fordeler å oppnå plussenergi-standard på områdenivå sammenlignet med for enkeltbygg. Strategien baserer seg på fem prinsipper [48]:

Save - Energisparing for å redusere nabolagets netto energiforbruk.

Shave - Utjevne toppene i energiforbruket ved hjelp av energilagring og kontrollsystemer for å oppnå økt egenforbruk og redusere belastningen på kraftnettet.

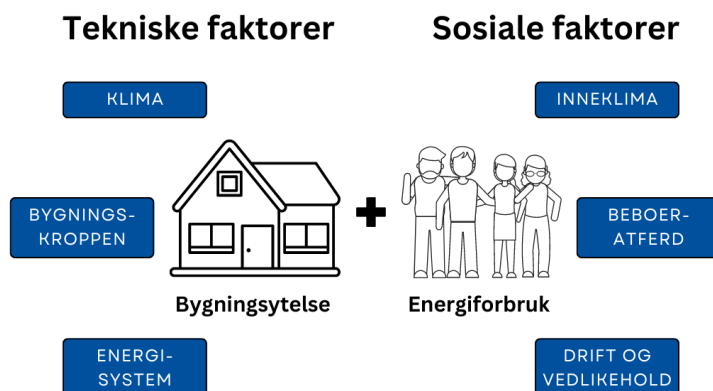
Share - Dele ressurser som energi, infrastruktur og fellesarealer med naboer.

Shine - Imponere med høykvalitets arkitektur som gjør beboerne og lokalsamfunnet stolte av nabolaget.

Scale - Benytte ringvirkningene fra prosjektet for å gjenskape løsningene på europeisk nivå.

### 2.3 Faktorer som påvirker energibruk i bygg

Energibruk i bygg påvirkes hovedsaklig av seks faktorer som vist i Figur 2.2. Klimaforhold, energisystemene i bygget og bygningskroppen er tekniske faktorer, mens inneklima, beboeratferd og drift og vedlikehold regnes som menneskelige påvirkede faktorer [49].



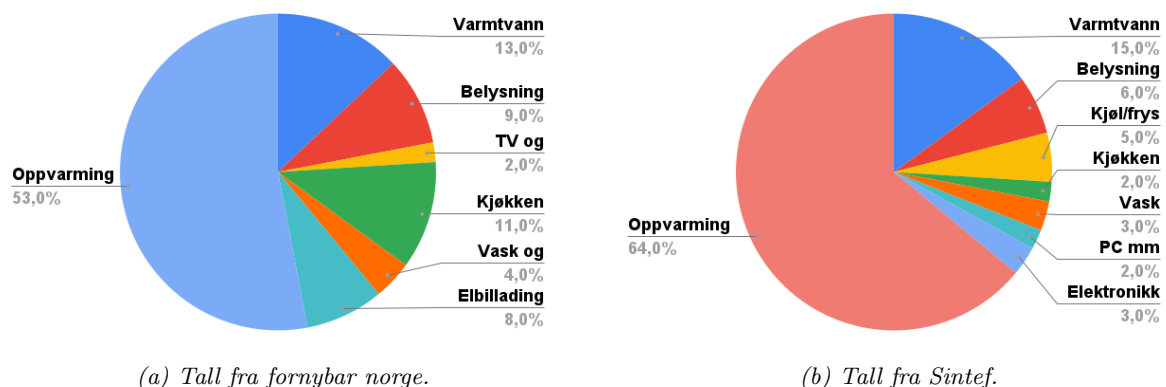
Figur 2.2: Faktorer som påvirker energibruk i bygg.

Variasjoner i disse faktorene gjør at det gjennomsnittlige forbruket i bygg varierer mye. Gjennomsnittlig strømforbruk for leiligheter i Norge fra ulike kilder er gitt i Tabell 2.2. Verdien oppgitt av Forbrukerguiden er gitt for ulike størrelser på leilighetene, hvor det tydelig vises at større leiligheter har større forbruk [50]. De andre tre kildene oppgir ikke størrelsen på boligene. Trøndelag kraft og Fjordkraft har benyttet tall fra SSB oppgitt i 2012, mens forbruket som Tibber har beregnet fra sine egne kunder gjelder for 2021-2022 [51].

Tabell 2.2: Gjennomsnittlig strømforbruk i norske leiligheter

Boligtype	Månedforbruk	Årsforbruk	Kilde
Leilighet	750 kWh	9000 kWh	Trøndelag kraft [52] Fjordkraft [53]
Leilighet 40 m <sup>2</sup>	200 kWh	2400 kWh	Forbrukerguiden[50]
Leilighet 110 m <sup>2</sup>	550 kWh	6600 kWh	Forbrukerguiden[50]
Leilighet	908 kWh	10 899 kWh	SSB [51]
Leilighet	696 kWh	8357 kWh	Tibber [51]
Gjennomsnitt	620,8 kWh	7451,2 kWh	

Figur 2.3 viser en typisk fordeling av strømforbruk for eneboliger. Figur 2.3a viser strømbruket for en enebolig med årsforbruk på 27 000 kWh basert på tall fra 2019, mens Figur 2.3b er basert på tall fra 2008. Fornybar Norge oppgir at oppvarming utgjør 53 % av totalen, mens Sintef anslår en romoppvarmingsandel på 64 % [54]. Nettselskapet Elvia oppgir en romoppvarminggrad på 60 % som tommelfingerregel [55], mens energirådgiver Trond Paasche i Enova sier at romoppvarming gjennomsnittlig utgjør 55 % av strømforbruket i en bolig [56]. På oppdrag fra Olje- og energidirektoratet (OED) har THEMA Consulting Group kommet fram til at 67 % av energiforbruket i husholdninger går til oppvarming [57]. Hvor mye av strømforbruket som går til oppvarming vil avhenge av hvilken oppvarmingskilde som benyttes. En bolig som benytter panelovner vil ha større romoppvarmingsandel enn en bolig som bare fyrer med ved. Romoppvarmingsandelen vil også avhenge av hvor høyt varmetapet gjennom bygningskroppen er. En godt isolert bolig vil holde på varmen lenger enn en bolig med dårlig isolasjon. I alle tilfellene er oppvarming den største forbruksposten i norske husholdninger som vist i Figur 2.3.



Figur 2.3: Fordeling av strømforbruk i husholdninger. Basert på [54, 58]

### 2.3.1 Varmetap

Bygningskroppen er en av de tekniske faktorene som påvirker energibruken i bygg, og det fokuseres ofte på bygningskroppens isolasjonsevne og tetthet. Når utetemperaturen er lavere enn innnetemperaturen vil bygget tape varme til omgivelsene, og når utetemperaturen er høyere enn innnetemperaturen vil varme overføres fra omgivelsene til bygget. Varmeoverføringen vil fortsette helt til bygget og omgivelsene har samme temperatur og er i termisk likevekt. All varmetransport foregår ved hjelp av mekanismene konduksjon, konveksjon og radiasjon, eller en kombinasjon av disse [59].

Konduksjon er varmeledning gjennom et fast stoff, en væske eller gass på grunn av bevegelse av molekylerne i materialet. Når temperaturen ikke er den samme i alle deler av stoffet vil molekylerne i den oppvarmede delen akselerere og kolliderer i de omliggende molekylerne som igjen vil akselerere. Denne dominoeffekten gjør at varmeenergien blir overført gjennom hele materialet slik at temperaturen blir jevnere fordelt [60]. Varmeledningen gjennom et stoff avhenger av tykkelsen på stoffet, temperaturforskjellen over stoffet, og konduktiviteten til materialet. Konduktiviteten angir hvor godt materialet leder varme, for eksempel har metaller høy konduktivitet, mens plast har lav konduktivitet. For et homogent stoff kan konduksjon uttrykkes gjennom Fouriers lov [61] som vist i Ligning 2.1

$$q_{kond} = -k \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad [W/m^2] \quad (2.1)$$

Der:

$k$ = termisk konduktivitet	$[W/m \cdot K]$
$T$ = temperatur	$[K]$
$L$ = tykkelse	$[m]$

Konveksjon er varmestrømning mellom et fast legeme og en væske eller gass. Naturlig konveksjon skyldes oppdrift som følge av temperaturforskjellene, og dermed forskjellene i massetettheten, i en væske eller gass. Derimot skyldes tvungen konveksjon strømning fra eksterne krefter som en vifte eller pumpe. Konveksjon kan uttrykkes gjennom Newtons avkjølingslov [61] som vist i Ligning 2.2.

$$q_{konv} = h(T_s - T_f) \quad [W/m^2] \quad (2.2)$$

Der:

$h$ = varmeovergangstallet/konveksjonskoeffisienten	$[W/m^2 \cdot K]$
$T_s$ = overflatens temperatur	$[K]$
$T_f$ = fluidets temperatur	$[K]$

Radiasjon er stråling av elektromagnetiske bølger fra en overflate, væske eller gass. Overflater med høy temperatur vil sende ut stråling med kortere bølgelengde enn overflater med lav temperatur [61]. Overflater vil også absorbere stråling fra andre overflater og dette kan uttrykkes som vist i Ligning 2.3.

$$q_{rad} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{surr}^4) \quad [W/m^2] \quad (2.3)$$

Der:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \text{emissivitet} & 0 \leq \epsilon \leq 1 & [W/m^2 \cdot K] \\ \sigma &= \text{Stefan Boltzmann konstant} & = 5,67 \cdot 10^{-8} & [W/m^2 \cdot K] \\ T_s &= \text{overflatens temperatur} & & [K] \\ T_{surr} &= \text{omgivelsene sin temperatur} & & [K] \end{aligned}$$

### 2.3.2 Energibalansen i bygg

Varmebalansen i et bygg er summen av alle varmestrømmene som opererer i bygget. For å opprettholde en behagelig innetemperatur kan det derfor være nødvendig med oppvarming og kjøling. Varmebalansen er vist i Ligning 2.4.

$$Q = (Q_i + Q_s) - (Q_v + Q_t) \quad (2.4)$$

Der:

$$\begin{aligned} Q_i &= \text{varmeavgivelse fra interne kilder} \\ Q_s &= \text{varmegevinst fra solinnstråling} \\ Q_v &= \text{ventilasjonstap, inkludert infiltrasjonstap} \\ Q_t &= \text{transmisjonstap} \\ Q &= \text{mengden oppvarming eller kjøling} \\ &\text{som trengs for å oppnå termisk balanse} \end{aligned}$$

Varmeavgivelse fra interne kilder kan skyldes både konduksjon, konveksjon og radiasjon, og kommer blant annet fra kroppsvarmen til menneskene som oppholder seg i bygget og elektrisk utstyr som avgir varme. Varmegevinsten fra sola overføres til bygget ved hjelp av stråling. Solinnstråling tilfører bygget betydelig med varme, og det er ønskelig å designe boliger slik at denne effekten utnyttes på best mulig måte [62]. Det burde for eksempel unngås sørvendte vinduer i rom som skal holdes kjølig slik som soverom. Sørvendte vinduer kan likevel være hensiktsmessig for å maksimere solinnstrålingen på vinteren når sola står lavt på himmelen, og minimere solinnstråling på sommeren når sola står høyt på himmelen. Av samme grunn vil det være nødvendig med et godt isolert tak for å holde et bygg kjølig om sommeren [63].

Varmetapet i forbindelse med utskiftning av luft kalles ventilasjonstap og skjer hovedsaklig som følge av konveksjon. Uønsket ventilasjon ved luftlekkasje gjennom gliper, fuger og lignende kalles infiltrasjonstap [64]. Formelen for ventilasjonstap er gitt i Ligning 2.5.

$$Q_v = \frac{C_v \cdot (N_{vent} + N_{inf}) \cdot V \cdot \Delta T}{3600} \quad (2.5)$$

Der:

$C_v$  = volumetrisk spesifikk varmekapasitet

$N_{vent}$  = antall luftskift per time grunnet ventilasjon

$N_{inf}$  = antall luftskift per time grunnet infiltrasjon

$V$  = luftvolum

$\Delta T$  = temperaturdifferanse mellom utgående og inngående luft

Varmetapet det vil fokuseres mest på i denne oppgaven kalles transmisjonstap, og skyldes hovedsaklig konduksjon gjennom ulike bygningsdeler. I disse beregningene spiller varmegjennomgangskoeffisienter,  $U$ , en viktig rolle.  $U$ -verdien angir hvor god isolasjonsevne en bygningsdel har og beregnes ved å ta invers av den totale termiske resistansen,  $R$  [61]. Transmisjonstapet fra innsiden til utsiden av veggen i Figur 2.4 kan beregnes som vist i Ligning 2.6a.

$$Q_t = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.6a)$$

$$Q_t = \frac{1}{R_{tot}} \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.6b)$$

$$Q_t = \frac{A \cdot \Delta T}{\frac{1}{h_i} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_u}} \quad (2.6c)$$

Der:

$U$  = varmekoeffisient

$A$  = areal

$\Delta T$  = Temperaturdifferansen mellom inne og ute

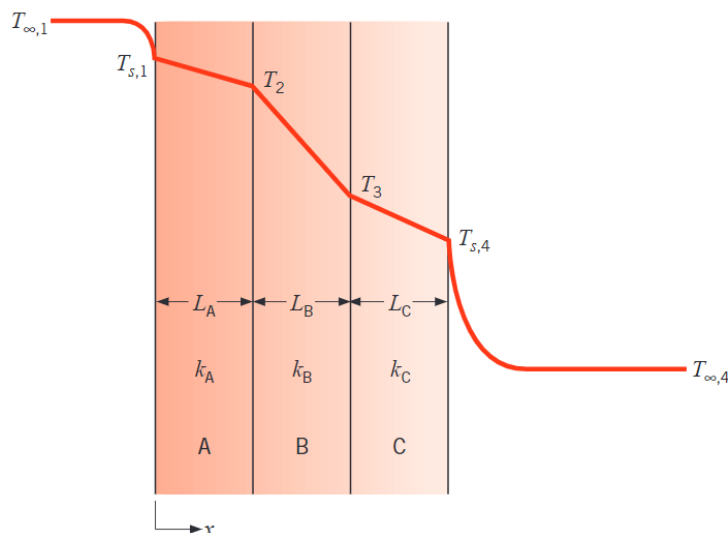
$R_{tot}$  = Total termisk resistans

$h_i$  = varmeovergangstallet på innsiden

$L$  = tykkelsen på laget

$k$  = konduktiviteten til laget

$h_u$  = varmeovergangstallet på utsiden

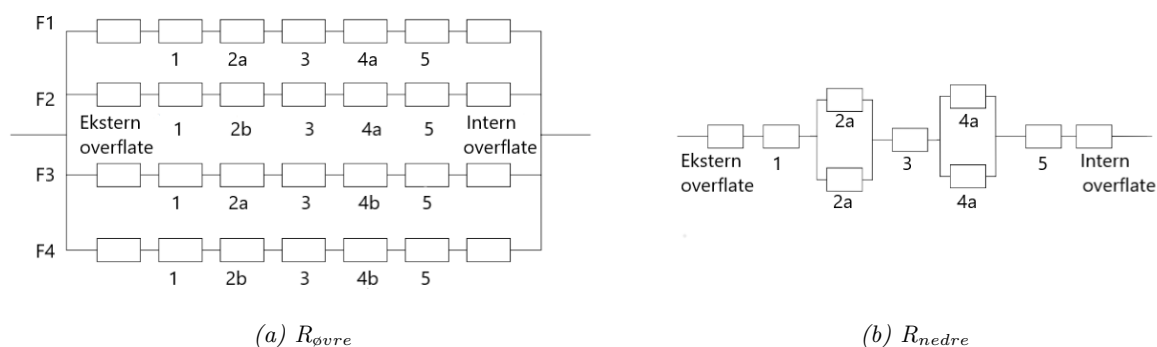


Figur 2.4: Varmetap gjennom en sammensatt vegg. Hentet fra [61]

For bygningsdeler med inhomogene stoffsjikt benyttes den totale termiske motstanden. Dette er gjennomsnittet av den øvre termiske resistansen,  $R_{\text{øvre}}$ , og den nedre termiske resistansen,  $R_{\text{nedre}}$ . Ved beregning av  $R_{\text{øvre}}$  antas det at varmeenergien kan ta et antall ulike gjennom vegg. Figur 2.5a viser hvordan  $R_{\text{øvre}}$  beregnes for en vegg med fem ulike lag hvor lag 2 og 4 består av to ulike materialer, a og b. Det er altså fire alternative veier varmen kan gå. I dette tilfellet vil  $R_{\text{øvre}}$  beregnes ved hjelp av Ligning 2.7 hvor F står for andelen av arealet til de ulike seksjonene, og R er den tilsvarende termiske resistansene. For å beregne  $R_{\text{nedre}}$  anses den termiske resistansen i seksjonene bestående av flere materialer som satt i parallell som vist i Figur 2.5b.  $R_{\text{nedre}}$  beregnes som vist i Ligning 2.8

$$R_{\text{øvre}} = \frac{1}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2} + \frac{F_3}{R_3} + \frac{F_4}{R_4}} \quad (2.7)$$

$$R_{\text{nedre}} = R_{\text{andre}} + R_{\text{fjerde}} = \frac{1}{\frac{F_{2a}}{R_{2a}} + \frac{F_{2b}}{R_{2b}}} + \frac{1}{\frac{F_{4a}}{R_{4a}} + \frac{F_{4b}}{R_{4b}}} \quad (2.8)$$



Figur 2.5: Beregning av total termisk motstand. Basert på [65]

### 2.3.3 Kuldebroer

Varmeenergi vil som sagt overføres fra et varmt område til et kaldt område, og hvor rask denne overføringen skjer avhenger av den termiske motstanden i bygningsdelen [66]. Siden varmeenergien alltid vil finne minste motstands vei vil området i en bygningsdel hvor den termiske motstanden er mindre enn omliggende områder fungere som hovedvei for varmeenergien. Slike områder kalles kuldebroer og disse kan stå for opptil 28 % av transmisjonstapet i et bygg [59]. Eksempler på kuldebroer er hjørner, vinduer og dører og stålbjelker eller trestendere i en isolert vegg. Kuldebroer rundt vinduer vil ha stor effekt på det totale varmetapet i bygget, men liten innvirkning på lokale temperaturer. En stålbjelke som stikker ut gjennom isolasjonen i en fasade vil ha liten effekt på totalt varmetap, men ha stor innvirkning på lokale temperaturer [67]. Hvis de lokale temperaturene inne i en bygningsdel blir lavere enn duggpunktstemperaturen, kan dette føre til mugg og råte. Risikoen for mugg og råte øker når antall luftskifter per time reduseres. For eksempel når byggets tetthet forbedres uten at det installeres et mekanisk ventilasjonssystem. I gamle bygg står luftinfiltrasjon og lufting via vinduer for frisk luft. Når slike bygg etterisolerers må det installeres et ventilasjonssystem for å opprettholde et godt inneklima [59].

### 2.3.4 Beboeratferd

Selv om det snakkes om hvor mye energi et bygg bruker, kan det argumenteres at det er beboerne, og ikke byggene selv, som er forbrukeren av energi [68]. Hvis en endring oppstår slik at det skaper ubehag, vil beboerne reagere på en måte som gjenoppretter komforten [69]. Beboeratferd som påvirker energibruken i bygg kan kategoriseres i adaptiv atferd og ikke-adaptiv atferd. Adaptiv atferd refererer til å enten tilpasse omgivelsene til å sine egne behov, eller tilpasse seg selv til omgivelsene. Tilpasningen kan være å åpne eller lukke vinduer, justere termostaten og skru av og på belysning, eller ved å kle seg annerledes, innta kald eller varm drikke eller forflytte seg mellom rom. Ikke-adaptiv atferd går ut på å at beboerne blir inaktive, eller rapporterer misnøye uten å prøve å tilpasse seg [68].

Tidligere fokuserte de fleste studier på de tekniske faktorene som påvirker energibruken i bygg, men i 2013 la Det internasjonale energibyrådet frem prosjektet *IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings* for å etablere et rammeverk for videre forskning på brukeratferd og hvordan dette påvirker byggets reelle energiytelse [70]. Flere studier viser at halvparten av energiforbruket kan relateres til de menneskelige påvirkede faktorene [71]. Blant annet viser en studie fra København som undersøkte 290 identiske hus, at energiforbruket for oppvarming varierte fra 9,7 kWh/m<sup>2</sup> til 197 kWh/m<sup>2</sup> som følge av forskjellene i brukeratferd [72]. Forskning som dette tyder på at tekniske løsninger alene ikke vil være tilstrekkelig for å redusere energibruken i bygg i tråd med klimamålene.

I forbindelse med EPISCOPE-prosjektet ble fremtidig utvikling av den norske boligmassens energibruk simulert for perioden 2016-2050. EPISCOPE var et forskningsprosjekt i EU som gikk fra 2013-2016 med mål om å oppnå en mer effektiv og transparent prosess for energieffektivisering og rehabilitering i den europeiske boligmassen. Simuleringen konkluderte med at bruk av

lokal energi ved å benytte varmepumper og solceller hadde høyere teknisk potensial for reduksjon i levert energi, i forhold til enda mer avansert og hyppig rehabilitering. Likevel var brukeratferd den faktoren med størst betydning for energibruken i boligmassen. Selv om det i alle scenarier var forventet bedre energieffektivitet og bruk av lokale energikilder, kan de potensielle energibesparelsene bli utlignet av endring i brukeratferd [73]. Denne negative tilbakeslagseffekten bunner i Jevons paradoks som påstår at besparelsene fra mer effektiv energibruk vil brukes til å kjøpe andre energirelaterte varer og tjenester [74, 75].

Det er flere analyser som tyder på at det kan være en sammenheng mellom prisen på strøm og elektrisitetsforbruket. I data som SSB har innhentet for elektrisitetsforbruket fra 1960-2008 vises det tydelig at nordmenn reduserte forbruket sitt i 1997 og 2002/2003. Denne reduksjonen er satt i sammenheng med høye strømpriser, samt mye mediefokus og oppfordringer fra myndighetene om å spare elektrisitet [76]. Vinteren 2021 til 2022 økte kraftprisene, og i desember 2021 ble det innført en støtteordning for husholdninger [77]. Dette førte til høye strømpriser og stor oppmerksomhet rundt strømprisen i media. NVE påpeker det i denne perioden var et fall i energiforbruk. Endringen i det temperaturkorrigerede forbruket var gjennom denne perioden på 9 % for de sørlige delene av Norge, men høyere i Nord-Norge hvor det var reduserte kraftpriser [78].

Rapporten *Økonomiske konsekvenser av høye kraftpriser og strømstønad* fra SSB, har analysert virkningene av høy strømpris og strømstøtte for vinteren 2021-2022. Virkningene for husholdninger er blant annet analysert med tanke på lokasjon, boligens egenskaper, mulighet for andre oppvarmingskilder og inntekten til husholdningen. Rapporten fant en betydelig gjennomsnittlig strømsparing for husholdninger gjennom denne tidsperioden. Beregninger viser at visse inntektsklasser brukte opp mot 20 % mindre strøm i enkelte vintermånedene i denne tidsperioden, sammenlignet med forbruket i perioder med lavere strømpriser. Rapporten viste også at mulighetene for strømsparing avhenger av hvilken hustype husholdningen har. Store eneboliger og våningshus har ofte mulighet til å benytte andre kilder enn elektrisitet til oppvarming. Før støtteordningen ble innført viser statistikken at energisparingen øker med kraftprisen, men at sammenhengen mellom forbruk og kraftpris ikke er like tydelig etter innføring av støtteordningen [77].

### 2.3.5 Tiltak som kan redusere energibruken i bygg

For å redusere energibruken i bygg kan det gjøres tiltak som påvirker en av de seks faktorene vist i Figur 2.2. Av tekniske faktorer er det enkleste å forbedre bygningskroppen eller installere et mer effektivt energisystem ettersom det ikke er mulig å endre klimaforholdene. De vanligste tiltakene for å forbedre isolasjonsevnen og tettheten til et allerede eksisterende bygg er ved etterisolering av vegger, tak og gulv eller utskiftning av vinduer. I en rapport skrevet av miljøstiftelsen ZERO antas det at energisparingspotensialet fra etterisolering av yttervegger i norske boliger er 0,9 TWh, men at etterisolering av vegger og tak bare er økonomisk lønnsomt om det likevel skal utføres rehabilitering [79]. Vinduer regnes som gamle når de er fra før slutten av 80-tallet og kan stå for opptil 40 % av varmetapet i en bolig. Energiglass ble introdusert rundt 1987, og har en folie



med lav emissivitet på utsiden av det innerste glasslaget for å redusere vinduets varmetap via stråling. Varmetapet i vinduer kan reduseres ytterligere ved at det benyttes edelgasser mellom glassene i stedet for luft for å minimere varmetapet via konveksjon. I tillegg kan varmetapet gjennom vinduer via konduksjon reduseres ved å benytte plastlister mellom glassene i stedet for aluminium som har en høyere termisk konduktivitet [80].

Installasjon av luft-til-luft varmepumpe i norske boliger antas å ha et potensial på 3,3 TWh [79]. Varmepumpens virkemåte er forklart i Kapittel 2.6. I følge Enova kan installasjon av varmepumpe gi energibesparelser på 20 % [81]. Varmepumpeprodusenten Toshiba oppgir at denne besparelsen kan bli så høy som 40 % [82]. Varmepumper egner seg godt i bygg som har et forbruk på over 15 000 kWh per år, benytter panelovner til oppvarming, har åpen planløsning slik at varmen kan fordeles fritt og bor i en bolig der det ikke er aktuelt å bytte vinduer eller etterisolere. En husstand med høyt forbruk og stor romoppvarmingsandel vil spare mest på å installere en varmepumpe [81]. En undersøkelse utført av Forbruksforskningsinstituttet (SIFO) viser samtidig at den potensielle energibesparelsen fra installasjon av varmepumpe kan utebli på grunn av endret atferd hos beboerne. Etter installasjonen er det mange husstander som øker innetemperaturen fra for eksempel 19 til 22/23°C, varmer opp flere rom enn tidligere og har det varmt i flere av døgnet timer [83].

Vannbåren varme defineres som et energifleksibelt energisystem da det kan benyttes ulike varmekilder for å varme opp vannet. Et fleksibelt energisystem innebærer ikke at flere varmekilder må være tilgjengelig samtidig, men at det er mulig å bytte varmekilde [84]. Det varme vannet kan sirkulere i rør i gulvet, eller i radiatorer. Vannet kan for eksempel varmes opp via en luft-til-vann eller væske-til-vann varmepumpe, med bruk av bioenergi som pellets og ved, eller ved hjelp av en solfanger. I motsetning til solceller som bruker solenergi til å generere elektrisitet, utnytter solfangere varmen i solenergien. Vannbåren varme i seg selv vil ikke redusere energibehovet, men avhengig av effektiviteten til den valgte varmekilden kan andelen elektrisitet som brukes til oppvarming reduseres [85]. Investeringskostnaden er relativt høy da det kan koste bortimot 1000 kr/m<sup>2</sup> i en eksisterende bolig, og er dermed mest lønnsomt om man likevel skal rehabilitere bygget [86]. Vannbåren varme i gulvet vil også gjøre det mulig å redusere innetemperaturen med flere grader, uten at det føles kaldere [87].

Ved å knytte det vannbårne systemet til fjernvarme vil det ikke benyttes strøm til oppvarming i det hele tatt [88]. Omtrent halvparten av varmen i det norske fjernvarmenettet er gjenvunnet varme som består av spillvarme fra industri og overskuddsvarme fra avfallsforbrenning [89]. I motsetning til panelovner der strømforbruket bare kan reduseres i noen få timer, legger vannbåren varme tilrette for en effektreduksjon i hele kuldeperioden [90].

I tillegg til kostnadskrevenne tiltak som beskrevet ovenfor kan beboere gjøre enkle endringer for å redusere energibruken i husholdningen, som for eksempel å redusere innetemperaturen. I følge Enova oppnås 5 % energibesparelse for hver grad temperaturen senkes [91]. Et verktøy for å oppnå dette er tiddstyrte termostater som kan sørge for at temperaturen er lavere på natten, eller når ingen er hjemme. Ved å sørge for å fylle opp vaskemaskinen og oppvaskmaskinen, bruke mindre tørketrommel, dusje kortere og unngå stand-by modus på elektriske apparater kan

strømforbruket også reduseres noe [92]. Smarthusløsninger kan også få ned strømkostnadene i husholdningen ved å bruke mer strøm i perioder med lav kostnad og mindre strøm når kostnaden er høy [93]. Dette blir forklart i mer detalj i Kapittel 2.5.1.

### 2.3.6 Enovastøtte for energi- og klimatiltak

Privatpersoner kan få økonomisk støtte av Enova for å gjennomføre visse energi- eller klimatiltak. Det er også mulig å få rådgivning om tiltak som kan gjennomføres uten støtte [94]. Noen av tiltakene som kan få finansiell støtte er solcelleanlegg, vannbåren varme, oppgradering av bygningskroppen og smart strømstyring.

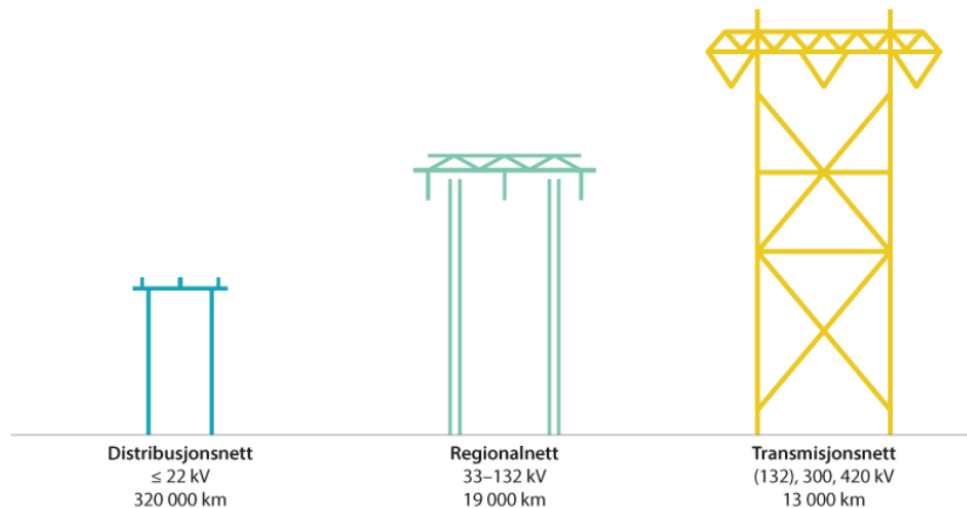
Enova gir støtte på opptil 47 500 kr dersom private produserer egen elektrisitet fra solceller. Installasjonen av systemet gir 7 500 kr i støtte. Deretter kan kundene få 2000 kr/kWp installert effekt opptil 20 kW. Dersom elproduksjon kombineres med andre energitiltak kan den finansielle støtten øke [94]. En av tiltakene solcellene kan kombineres med er vannbåren varme, som er et tiltak godt egnet for boliger hvor det skal foretas en større oppgradering. Støtten er på opptil 10 000 kr, og kravet er at det også investeres i en fornybar varmekilde til oppvarmingen av vannet [86].

Hvor mye støtte privatpersoner kan få fra Enova for å oppgradere bygningskroppen avhenger av hvilket energinivå boligen oppgraderes til. Den maksimale støtten er på 150 000 kr. Da oppgraderes boligen til et nivå tilnærmet passivhus, men det gis også støtte til energinivåer tilnærmet lavenergi og TEK-10 [95]. Enova dekker opptil 35 % av installasjon- og utstyrsutgiftene opptil 10 000 kr i forbindelse med pris- og effektstyrte energilagringssystem [93]. NVE sier også at høye energipriser gjør at husholdninger og bedrifter hurtigere tjener inn investeringer gjort for langsiktige energisparetiltak [78].

## 2.4 Det norske kraftnettet

Kraftnettet transporterer strømmen fra produksjon til forbruker, og er bygd opp av transmisjonsnettet, regionalnettet og distribusjonsnettet [96]. Antall kilometer med kraftlinjer og spenningsnivået til de ulike nettene er gitt i Figur 2.6. Transmisjonsnettet er hovednettet av kraftoverføringsklabler i Norge. Siden tapene i kraftlinjene minsker med høyere spenningsnivåer benyttes det høy spenning i transmisjonsnettet da dette nettet må frakte strømmen over store avstander [96]. De vanligste spenningsnivåene i transmisjonsnettet er 132 kV, 300 kV eller 420 kV [97]. Regionalnettet er bindeleddet mellom transmisjonsnettet og distribusjonsnettet, og spenningsnivået på kraftlinjene er mellom 132 kV og 66 kV. Distribusjonsnettet er koblet direkte til forbrukeren og har spenninger fra 22 kV, ned til lavspenningsnettet på 230 V [98]. Spenningen i overføringen mellom de ulike nettene kan økes eller senkes ved hjelp av transformatorer [96].

Statnett opererer den største delen av transmisjonsnettet i Norge, mens de resterende kraftlinjene driftes av regionale nettselskaper. Statnett har derfor ansvaret for at kraftsystemet er i balanse og at kvaliteten på kraften som leveres er tilfredsstillende [99]. Viktigheten av kraftbalansen utdypes i Kapittel 2.5.



Figur 2.6: Det norske kraftnettet. Hentet fra [100].

### 2.4.1 Kraftmarkedet

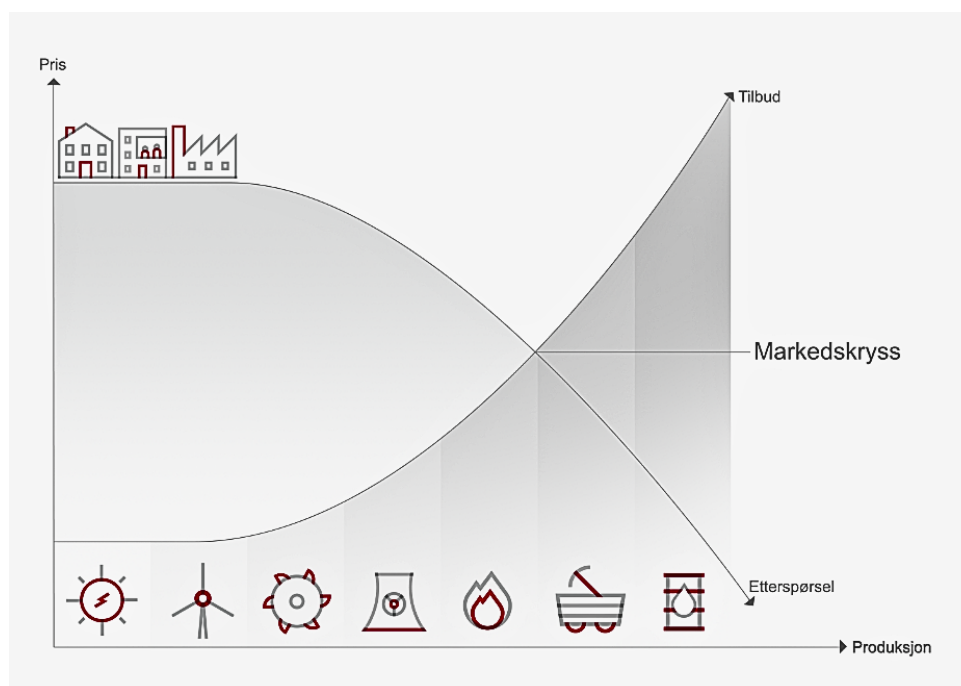
Den viktigste oppgaven til kraftmarkedet er å sørge for at det er en balanse mellom produksjon og forbruk av kraft. Elektrisitet skiller seg fra andre varer siden strømmen må produseres samtidig som den blir brukt, da lagringsmulighetene er begrenset. Dette gjør at det kreves kontinuerlig informasjon om mulighetene for produksjon og kraftbehovet til både private og industri. Kraftmarkedet sikrer også at ressurser benyttes på en effektiv måte, siden kraftbalansen gjør at overskuddsproduksjon minimeres. Et annet aspekt ved elektrisitet som skiller seg fra andre varer er at forbrukerne kan benytte strøm uten å vite om det er nok produksjon til å dekke etterspørselen [101].

Norge var et av de første landene i verden som liberaliserte kraftmarkedet som følge av energiloven som ble innført 1990. Denne loven gjorde at kunden selv kunne velge kraftleverandør, noe som åpnet opp for konkurranse mellom leverandørene. Kraftbørsen Nord Pool ble opprettet i 1996 da de andre nordiske landene også hadde liberalisert sine energilover. I dag er Norge en del av et felles nordisk kraftmarked med Sverige, Danmark og Finland. Dette felles kraftmarkedet, og Norges overføringskabler, gjør at Norge også er en del av det europeiske kraftmarkedet. Kraftmarkedet kan deles inn i to hovedmarkeder: Engros- og sluttbrukermarkedet [102]. Engrosmarkedet består av kraftprodusenter, meglere, kraftleverandører og store industrikunder. I sluttbrukermarkedet inngår forbrukerne en avtale med valgfri kraftleverandør [102, 103].

### 2.4.2 Strømpriser

Prissetting av strøm er et resultat av tilbud og etterspørsel. Dette gir en lav strømpris når etterspørselen er lav og produksjonen er høy, mens prisen vil være høy når det er lav produksjon og høy etterspørsel [104]. Prisene vil også være avhengige av vær og temperatur, samt overføringskapasiteten innad i Norden og Norge [103]. Nord Pool beregner prisen for kraft for det kommende døgnet. I denne beregningen melder kraftprodusentene hvor mye de

ønsker å produsere, og til hvilken pris de ønsker å selge strømmen. Prisen på strømmen settes i skjæringspunktet mellom etterspørsel og tilbud. Dette punktet kalles markedsprisen, som vist i Figur 2.7.



Figur 2.7: Graf for prissetting av strøm. Hentet fra [105]

De tre hovedtypene kraftkontrakter forbrukerne kan velge mellom er: Fastpriskontrakter, kontrakter med standard variabel pris eller kontrakter basert på markedspris med påslag (spotprisavtale). En fastpriskontrakt gir en fast kraftpris over en periode og leverandøren er nødt til å levere strøm til avtalt pris, uansett hvordan kraftprisen endrer seg i markedet. Fastprisen fastsettes av leverandøren og er basert på forventninger om kraftprisen, pluss et påslag for å dekke kostnader. Som kunde vil man spare penger på en fastpriskontrakt dersom fastprisen er lavere enn markedsprisen for kraft. Kontrakter med standard variabel pris ligner på en fastpriskontrakt, men gjelder ofte for kortere perioder. Prisene i denne avtalen er mer avhengig av utviklingen i kraftmarkedet, og kunden må bli varslet om prisendringer 14 dager før de trer i kraft. I en spotprisavtale følger kraftprisen markedsprisen som fastsettes av Nord Pool. I tillegg må kunden også her betale et påslag [102].

Forbrukernes strømrregning består av flere komponenter: Kraftprisen, nettleie, elavgift, merverdiavgift, påslag til Enova og eventuelt elsertifikater. Kraftprisen er det elektriske kraft koster, og denne andelen av strømrregninga avhenger av prisnivået i markedet og forbruket. Alle forbrukere skal ha en smart strømmåler (AMS) som gir informasjon til nettselskapet om kundens strømforbruk. Denne informasjonen benyttes i utregningen av strømrregninga. Nettleie er den kostnaden som omhandler tilknytning og bruk av kraftnettet, og reflekterer kostandene for transporten av strøm til forbrukeren. Nettleia fastsettes av nettselskapene og er basert på en inntektsramme, og prinsipper for tariffing, fastsatt av NVE. Både elavgiften, påslaget og merverdiavgiften er politisk bestemte størrelser [102].

Elavgiften kalles også forbruksavgift på elektrisk kraft og betales til staten på alt forbruk av elektrisk energi. Denne avgiften kan variere, og avgiftssatsen er lavere for blant annet industri og bergverk [106]. Enovapåslaget er en avgift på 1 øre/kWh som går til det statlige Klima- og energifondet som forvaltes av Enova SF. Dette fondet har som formål å fremme energieffektivisering og en miljøvennlig omlegging av energibruk og energiproduksjon [107]. Merverdiavgiften, også kjent som moms eller mva, er på 25 % av den totale prisen av regningen. Virksomheter krever moms av kundene sine på vegne av staten [108]. Elsertifikater er en støtteordning for fornybar kraftproduksjon. Kraftleverandøren legger elsertifikatkostnadene inn i strømprisen. Dermed finansierer kundene denne ordningen via strømrregningen [109]. Elsertifikatenes pris varierer med serfifikatmarkedet [102].

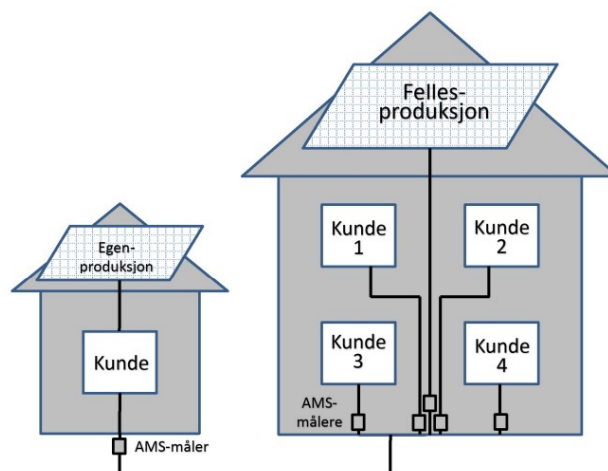
### 2.4.3 Modeller for deling av overskuddsproduksjon

Dersom en nettkunde både forbruker og produserer elektrisitet bak eget tilknytningspunkt kalles kunden en prosument eller plusskunde. Dersom disse kundene har et produksjonsoverskudd kan denne energien selges til kraftleverandøren. Plusskunder trenger ikke å betale nettleie for forbruket av egenprodusert strøm, eller fastleddet for innmating [110]. I tillegg har elektrisk kraft produsert til eget forbruk fritak fra elavgiften [111]. Den innmatede effekten ut på kraftnettet kan ikke overstige 100 kW. Dersom produksjonsoverskuddet overstiger denne verdien er kunden nødt til å betale fastledd for innmating. Anlegget til plusskunder er ikke konsesjonspliktig, og omsetningen fra anlegget krever ikke omsetningskonsesjon. Omsetningskonsesjon kreves bare dersom den samlede produksjonen fra anlegget overskrider 1 GWh i året [110]. Plusskundeordningen er i all hovedsak rettet mot husholdninger med egen produksjon og en begrenset mengde overskuddskraft å sende på nettet. Ordningen er ikke tilrettelagt for bygg med flere strømabonnenter og omfatter derfor flest eneboliger [111]. I Norge var det omtrent 16 500 plusskunder tilknyttet strømmettet ved utgangen av 2022. Disse bidro med cirka 60 GWh netto strøm inn på kraftnettet det samme året [112].

For å legge til rette for mer kraftproduksjon foreslo OED høsten 2022 å etablere en ny ordning for deling av egenprodusert fornybar strøm. Forslaget er en utvidelse av plusskundeordningen og endringene vil gjøre det mulig for flermannsboliger, leilighetskomplekser og næringsbygg å være prosumenter. Denne ordningen gir også fritak fra nettleie og elavgift for egenprodusert kraft. Reguleringsmyndighetene for energi (RME) og Skattedirektoratet (SKD) utarbeidet et forslag for å legge til rette for dette med høringsfrist 30. september 2022 [111]. Figur 2.8 viser forskjellen på nåværende ordning (t.v) og den foreslåtte ordningen (t.h). Den nåværende ordningen sier at det kun kan deles produksjon bak samme AMS-måler, mens med den nye ordningen kan produksjonen deles mellom flere kunder bak produksjonsanleggets AMS-målere.

I den nye ordningen er det foreslått at ”Produsenter av fornybar kraft kan dele produksjonen sin med øvrige nettkunder på samme eiendom. Kunder som går sammen om å investere i fornybar kraft innenfor en felles eiendom, vil dermed kunne utnytte produksjonen til å redusere sitt eget forbruk fra nettet over en time”. RME har definert bergrepet eiendom til å gjelde ett og samme kommune-, gårds-, bruks- og festenummer. RME har foreslått at grensen for installert

effekt på hver eiendom er på 500 kWp. Innføring av denne ordningen vil føre til en omfordeling av kostnadene mellom nettkundene. De som blir en del av ordningen vil få lavere nettleie og reduserte avgifter, mens alle andre nettkunder får høyere nettleie for å dekke opp dette [113].



Figur 2.8: Illustrasjon av nåværende ordning for deling av overskuddsproduksjon (t.v) og forslag til ny ordning (t.h). Hentet fra [113].

## 2.5 Fleksibilitet i kraftnettet

Elektrifiseringen av samfunnet og mer variabel fornybar kraftproduksjon øker behovet for fleksibilitet i kraftnettet. Fleksibilitet kan defineres som evnen kraftsystemet har til å opprettholde stabile priser og fortsette med kontinuerlig kraftforsyning selv om produksjonen og forbruket varierer [5]. Utfordringene med fleksibilitet i kraftnettet kan ses på i tre ulike tidsdimensjoner: Energibalanse, effektbalanse og frekvensbalanse.

### Energibalanse

Energibalansen omtales også som kraftbalansen og handler om likevekt mellom produksjon og forbruk av kraft over et år. Det er et mål på om Norge har overskudd eller underskudd av kraft, og om landet kan eksportere kraft eller er avhengig av å importere kraft fra andre land [114].

### Effektbalanse

Effektbalansen tilsier om det er likevekt mellom produksjonskapasitet og forbruk i topplasttimene på de kaldeste vinterdagene. Med andre ord er beskriver effektbalansen evnen til å levere nok effekt når Norges strømforbruk er på sitt høyeste [114].

### Frekvensbalanse

Spennings frekvens må i følge FoL §3.2 holdes innenfor  $50 \text{ Hz} \pm 2 \%$  til enhver tid, helt ned på minutt- og sekundnivå. Frekvensen økes når det produseres mer strøm enn det brukes, og faller når produksjonen er lavere enn strømforbruket. Hvis frekvensbalansen ikke opprettholdes kan det føre til overbelastning av nettet og skade på elektrisk utstyr tilkoblet nettet [114].

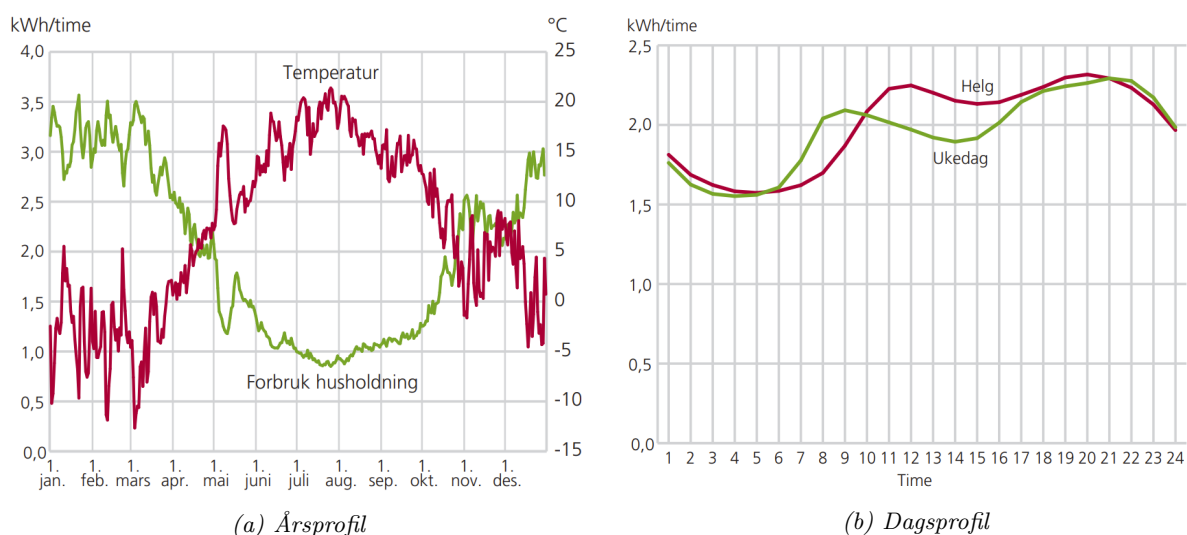
Energibalansen, effektbalansen og frekvensbalansen påvirkes av hverandre. Hvis det er kraftunderskudd som følge av lite vann i magasinene kan dette svekke evnen til å levere nok

effekt som igjen fører til at frekvensen faller under 50 Hz. På grunn av denne sammenhengen vil kilder til fleksibilitet i frekvensmarkedene også kunne bidra til å løse effektutfordringer [114].

### 2.5.1 Forbrukerfleksibilitet

Selv om Norge allerede har regulerbar vannkraft som gjør at kraftnettet er mer fleksibelt enn i mange andre land, vil det være utfordringer med å oppnå energibalanse i kalde og tørre år. Sammenhengen mellom nedbør og vind gjør at vindkraftproduksjon også er lavere i tørre år. Utfordringen er størst i perioden som kalles *vårknipa*. Vårknipa inntreffer ofte i slutten av april som følge av at magasinene har blitt nedtappet etter vinteren og snøen ennå ikke har begynt å smelte slik at magasinene fylles opp igjen. For å løse dette kraftunderskuddet er Norge avhengig av å importere kraft fra utlandet. På grunn av høy forbruksvekst de neste ti årene kan det bli mer vanlig at Norge også opplever kraftunderskudd i normalår. Løsningen er på lang sikt å bygge ut ny produksjonskapasitet. Det er begrenset hva forbrukere kan gjøre for å opprettholde kraftbalanse i Norge, men på kort sikt kan installasjon av solceller for å øke produksjon, og energieffektivitet for å minske forbruk, bidra noe. Forbrukerfleksibilitet gjennom tiltak som flater ut forbrukskurven kan imidlertid bidra til å opprettholde effektbalanse og frekvensbalanse.

Energiforbruket i norske husstander kan visualiseres i lastprofiler for ulike tidsperioder. Figur 2.9 er hentet fra SSB og viser eksempler på forbrukslaster for et år og et døgn. Som vist i Figur 2.9a er det høyest forbruk i vintermånedene og lavest i juli. I Norge øker forbruket når utetemperaturer synker og omvendt da en stor andel av strømforbruket går til oppvarming. For land der det i større grad benyttes aircondition og kjøling på det varmeste om sommeren vil forbruket gå opp når utetemperaturer er på sitt høyeste. Figur 2.9b viser hvordan effekttoppene er størst på morgningen og på kvelden, effekttoppene er forskjøvet med et par timer i helgene.



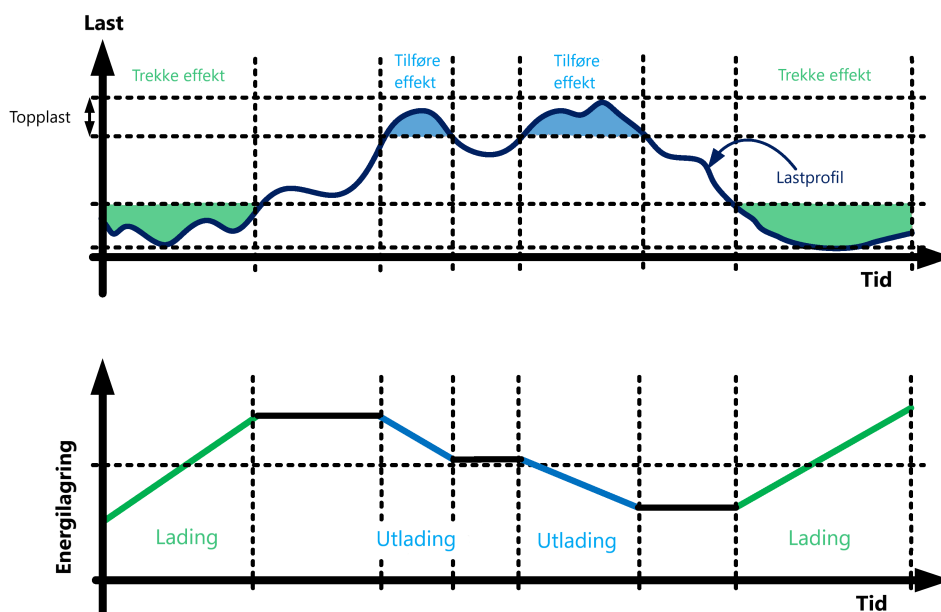
Figur 2.9: Lastprofiler i Norge. Hentet fra [115].

Tidligere har de fleste strømkunder vært passive, som vil si at de bruker strøm når de trenger det, uten å tenke på hvordan dette påvirker kraftnettet eller strømreregningen. Innføringen av spotprisavtaler og den nye nettleiemodellen har gjort at flere kan kalles aktive strømkunder

fordi de tilpasser strømforbruket til tidspunkter i døgnet. Gjennom spotprisavtaler betaler kunden for det strømmen koster å produsere akkurat i det øyeblikket den forbrukes, og i den nye nettleiemodellen beregnes fastleddet ut ifra et gjennomsnitt av strømkundens effekttopper. Aktive strømkunder bidrar til fleksibilitet i nettet da de bidrar til å spre forbruket utover døgnet ved hjelp av lastflytting eller *peak-shaving*.

Lastflytting innebærer å flytte forbruket fra et tidspunkt med høye priser og høy pågang til et tidspunkt med lavere priser og lavere etterspørsel, men den totale mengden energi som forbrukes fra nettet forblir den samme [116]. Lastflytting kan til en viss grad gjøres manuelt ved at forbrukeren for eksempel ikke setter elbilen til lading når effekttoppene er høyest på ettermiddagen, men heller starter ladingen senere på kvelden. Denne forbruksendringen krever ingen investeringer, men er til gjengjeld ikke like effektiv som lastflytting ved hjelp av smarte styringssystemer.

EUs økodesignforordning, som har som mål å sørge for at produkter som selges i EU møter visse ytelses- og informasjonsrelaterte krav for å sikre bærekraft, stiller nå krav om styringssystemer [117]. Dette har blant annet ført til at de fleste elektriske varmeovner kan kobles opp på Wi-Fi slik at de kan bidra med fleksibilitet ved å styres til å jevne ut forbruket over døgnet og kutte boligens effekttopper. Et annet eksempel er å installere en smart varmtvannsbereder. I husholdninger står varmtvannstanker for 13 % av energibruken. Vanligvis vil en varmtvannsbereder starte oppvarming av nytt vann rett etter forbrukeren har tatt morgendusjen selv om det er mange timer til dette vannet trengs til en ny dusj. Ved å ha en smart varmtvannsbereder kan oppvarmingen av vann flyttes ut av topplasttimene og dermed gi mer fleksibilitet i energisystemet. Varmt vannstanker har rask responstid, og en fleksibel varmtvannsbereder kan også kobles ut flere ganger i minuttet om frekvensen i nettet avviker for mye [118].



Figur 2.10: Peak-Shaving med batteri. Basert på [119].

Peak-shaving innebærer også å redusere forbruket i topplasttimene, men uten å forskyve det



til et annet tidspunkt [116]. Peak-shaving kan oppnås ved smarte styringssystemer som kobler ut elektrisk utstyr i tidspunkt med høy etterspørsel, eller kobler over til en annen energikilde. Peak-shaving gjennom energilagring bidrar til å opprettholde effektbalanse og frekvensbalanse ved å redusere og glatte ut forbruket som vist i Figur 2.10. Energilagringssystemet kan hente strøm fra nettet når det er lav etterspørsel og lav strømpris, og brukes når effekttoppene er høye slik at forbrukeren unngår å trekke effekt fra nettet når strømmen er dyr. I tillegg til at forbrukeren vil kunne redusere strømregningen, kan peak-shaving være et godt alternativ eller supplement til kostnadskrevenende nettutbygging siden det avlaster nettet. Lavere kostnader for nettleverandøren vil på sikt også gagne forbrukeren da dette fører til en lavere økning av nettleien [120].

## 2.5.2 Energilagringssystemer

Når energiproduksjon og energiforbruk ikke sammenfaller, som ofte er tilfellet i kraftsystemer som belager seg på væravhengige fornybare energikilder som solkraft og vindkraft, er det nødvendig med energilagring. I Norge inntreffer det høyeste forbruket på de kaldeste høytrykksdagene på vinteren. På disse dagene er det lav produksjon fra solceller og vindturbiner, og det kan derfor være nødvendig å benytte fossile kilder til å dekke spisslasten. Det er dermed viktig å utvikle teknologier for energilagring for å kunne gjennomføre det grønne skiftet. Figur 2.11 viser eksempler på ulike energilagringssystemer kategorisert etter hvilken form energien lagres i. Hvor godt et energilagringssystem egner seg til ulike formål avhenger av de tekniske egenskapene det har [121].

KINETISK ENERGI			POTENSIELL ENERGI		
Termisk	Elektrisk	Mekanisk	Elektrokjemisk	Kjemisk	
Oppvarmet vann/ kleberstein	Superkondensator	Svinghjul	Pumpekraft	Litium-ionbatteri	Hydrogen
Smeltet salt	Superleder Magnetisk lagring		Lagring av trykkluft	Blybatteri	Syntetisk naturgass
Faseforandrings- materialer				Flytbatteri	
				Natrium- svovelbatteri	

Figur 2.11: Energilagringssystemer. Basert på [121].

Ved å sette den maksimale effekten systemet kan ta opp eller levere til enhver tid opp mot varighet, får man informasjon om teknologien egner seg best til å levere store mengder energi over lang tid, eller mindre mengder energi over kortere tid. Direkte lading av strøm i kondensatorer og superleder vil for eksempel egne seg best for korte tidsrom, mens kjemisk lagring, der strøm blir gjort om til hydrogen som deretter kan re-elektrifiseres gjennom brenselceller, kan lagres i flere år. Til gjengjeld har re-elektrifiseringsprosessen lav virkningsgrad med en effektivitet på 30-35 %. Utladningstiden er tiden systemet kan levere strøm ved maksimal effekt og responstiden betegner hvor lang tid det tar før systemet leverer energi på maks effekt. Et stort pumpekraftverk kan ha

utladingstid på mer enn et døgn, mens et svinghjul vil bare vare i omtrent 15 minutter. Likevel har begge teknologiene kort responstid på henholdsvis sekunder og millisekunder. Andre faktorer kan også avgjøre hvilken teknologi som er mest gunstig, for eksempel vil termisk energilagring som varme eller kulde i termisk masse være mest effektivt om det utnyttes direkte som termisk energi og ikke må gjøres om til strøm igjen. Fysisk størrelse, vekt og investeringskostnad har også mye å si for hvilket bruksområde løsningen egner seg til. I denne oppgaven vil det fokuseres på elektrokjemisk lagring med batterier.

### 2.5.3 Litium-ionbatterier

Økende etterspørsel etter solceller på bygg vil føre med seg en økt interesse for batterier for å kunne utnytte mesteparten av solkraften selv. Andelen batterier som installeres bak måler i boliger kan derfor forventes å øke i takt med installert kapasitet fra solceller [114]. I følge en rapport skrevet av Det Norske Veritas (DNV) på oppdrag fra Enova vil litium-ionbatterier (LIB) være den best egnede løsningen for energilagring i Norge, blant annet fordi det er en moden og velutprøvd teknologi og investeringskostnadene er fallende [121]. Litium-ion er en samlebetegnelse for alle batterier som bruker litium som elektrolytt. Det er den mest utbredte typen sekundærbatterier, som i motsetning til primærbatterier, kan lades opp igjen etter utlading. I Europa forventes det en kraftig økning i installert kapasitet for LIB fra 0,6 GW i dag, til 12 GW i 2030 og opp mot 30 GW i 2050. I rapporten *Energy Transition Norway 2020* forespeiles det at Norge vil ha 190 MW installert lagringskapasitet med LIB i 2050, noe som tilsvarer 0,4 % av totalt installert kapasitet i det norske kraftsystemet [121].

#### Virkemåte

Et batteri omformer kjemisk energi til elektrisk energi, og for et litium-ionbatteri er denne omformingsprosessen 90-98 % effektiv [122]. Inne i batteriet er det en elektrokjemisk celle som består av to elektroder og en elektrolytt. Den negative elektroden kalles anode, og den positive elektroden kalles katode. Batterier kan kobles sammen i serie eller parallell. I serie kobles positiv pol til negativ pol. Spenningen blir da summen av de enkelte batterienes spenning. I parallell kobles alle negative poler sammen og alle positive poler sammen. Spenning blir ikke større enn hver enkelt celles spenning, men batteriet kan levere større strøm på grunn av mindre indre motstand [123].

Et LIB klassifiseres etter hvilket katodemateriale det har. Anodematerialet er som oftest grafit [124]. Tre vanlige katodekombinasjoner er vist i Tabell 2.3. NCA-batteriet har høyest spesifikk energi, men i stasjonære lagringssystemer er syklusliv og sikkerhet viktigere å ta hensyn til. NMC-batteriet har lengst levetid, men LFP-batterier er noe sikrere å drifte [125]. Både NCA- og NMC-batteriene benytter seg av nikkel og kobolt som er begrensede ressurser, og særlig kobolt er forbundet med miljøskadelig og uetisk utvinning [121].

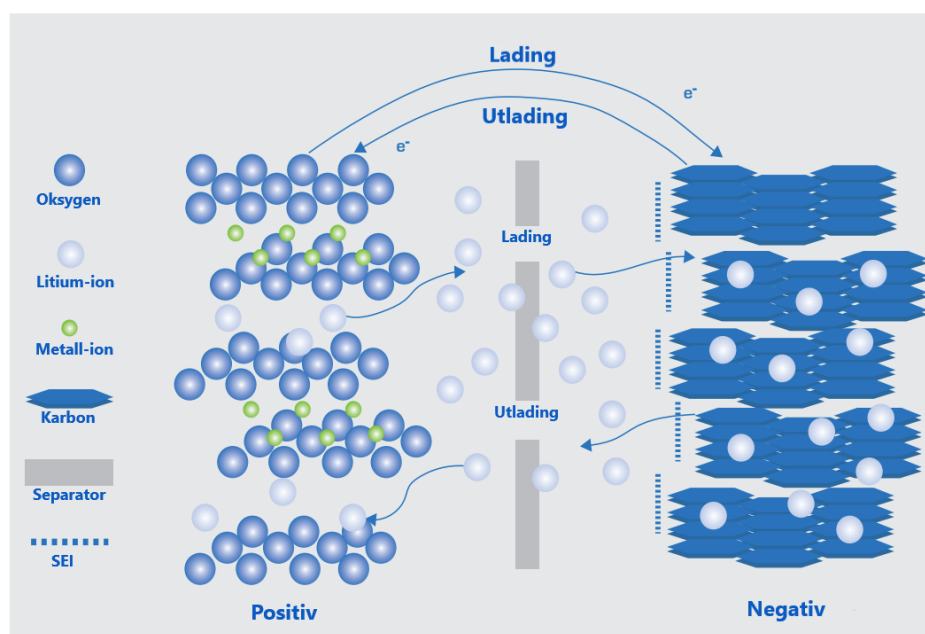
Anoden og katoden er adskilt med en separator som vist i Figur 2.12. Separatoren består av et porøst materiale som skal hindre fysisk kontakt mellom de to elektrodene, da dette kan føre til kortslutning, samtidig som det tillater ionene å forflytte seg mellom elektrodene [122]. For å

Tabell 2.3: Egenskaper til Litium-ionbatterier med ulike katodematerialer. (Hentet fra [125])

Batteritype	NCM	NCA	LFP
Katodemateriale	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	LiNiCoAlO <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub>
Spesifikk energi	140-200	200-260	90-140
Syklusliv	1000-3000	1000-1500	≤ 2000
Sikkerhet <sup>1</sup>	2	2	3

<sup>1</sup> Relativ rangering fra 1-3 basert på der 1 er minst sikker og 3 er mest sikker.

forhindre overoppheting og brann har separatorene en innebygd avstengningsmekanisme som gjør at porene lukkes ved forhøyet temperatur i materialet slik at ionstrømmen mellom elektrodene forhindres [126]. Hvis separatorene smelter helt derimot, kan det oppstå en ukontrollerbar termisk kjedereaksjon med varmeutvikling og brannfarlige avgasser. I verste fall kan batteriet ta fyr og eksplodere [127, 128]. Når batteriet utlades foregår det en oksidasjonsreaksjon på anoden og litiumionene forflytter seg til katoden og elektroner frigis. Disse elektronene strømmer i den ytre kretsen over til katoden der de tas opp i en reduksjonsreaksjon. Når batteriet lades opp reverseres prosessen og litiumioner går tilbake til anoden hvor de blir redusert tilbake til litiumatomer [129].



Figur 2.12: Litiumionbatteri. Hentet fra [122].

Batteriets levetid avhenger av hvordan batteriet brukes og oppbevares. Kalenderdegradering skjer med tiden selv om batteriet ikke brukes, og avhenger av eksterne forhold som temperatur. Veldig lave eller veldig høye temperaturer øker degraderingen. Syklusaldring avhenger av hvordan og hvor mye batteriet lades og utlades [124]. I løpet av litium-ionbatteriets første syklus dannes det en tynn film på anoden som kalles SEI-film (solide electrolyte interphase). Filmen oppstår som følge av reaksjonen mellom elektrolytten og anoden. SEI-filmen er nødvendig for at litiumioner skal kunne bli tatt opp i anoden og gjort om til litiumatomer igjen, men over tid bygger denne filmen seg opp og kan påvirke batteriets kapasitet negativt da det reduserer mengden reaktiv litium [130]. Etttersom mengden brukbar litium synker økes den

indre motstanden i batteriet og batteriets kapasitet avtar [124].

Batterihelsen (SoH) indikerer hvor mye av levetiden til batteriet som gjenstår. Ettersom batteriet degraderes synker andelen av den initielle kapasiteten som er tilgjengelig fordi reaktantene blir immobile. Et nytt batteri har SoH på 100 % mens et batteri på slutten av levetiden har SoH på 0 %. En annen viktig indikator er ladenivået (SoC) som oppgir hvor mange prosent batterikapasitet som er tilgjengelig til enhver tid. Ladetilstanden kan også beskrives ved hjelp av graden av utlading (DoD) som er det samme som 100 % minus SoC. Batteriets ladehastighet oppgis av C-raten som er et mål på hvor raskt batteriet lader i forhold til en full syklus i løpet av en time. Med en C-rate på 2C vil det ta 30 minutter å lade batteriet fra 0-100 % og med en C-rate på C/2 vil det ta to timer å fullade batteriet [59]. Temperaturkontroll er kritisk når batterier brukes som energilagringssystem da den viktigste faktoren til å redusere batterilevetiden er temperaturøkninger. Som en retningslinje vil levetiden reduseres med en faktor av 2 for hver tiende grad temperaturen øker [130].

#### 2.5.4 Dimensjonering av batterisystem for lagring av solkraft

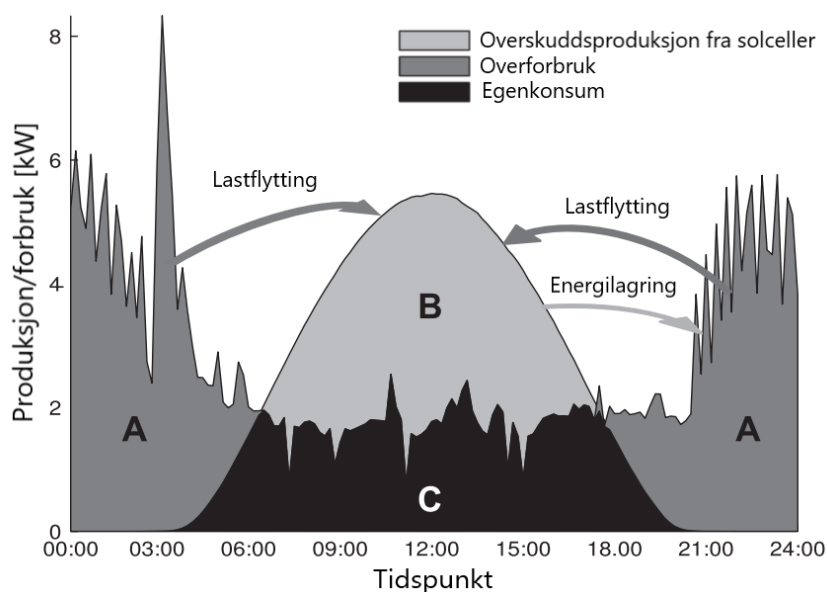
Prosumenter som har solceller på taket kan øke mengden av egenkonsum ved å integrere et energilagringssystem. Virkemåten til solcellepanel eller fotovoltaiske (FV) panel blir beskrevet mer i detalj i Kapittel 2.7. Som nevnt tidligere samsvarer sjelden produksjonsprofilen til fornybar energi med forbruksprofilen som vist i Figur 2.13, men et batteri vil kunne jevne ut dette. Batteriet kan lades og utlades på strategiske tidspunkt som vist i Figur 2.10. Et batterisystemet kan også lære forbrukernes lastprofil ved hjelp av avanserte kontrollsystemer og på den måten forutse effektoppene slik at det kan bytte fra nettilkobling til batteri når det trengs mest [131].

For at samspillet mellom solcellene, batterisystemet og kraftnettet skal være så optimalt som mulig er det viktig å dimensjonere batterisystemet etter døgnvariasjonene i produksjon og forbruk. To indikatorer som brukes for å beskrive samspillet mellom produksjon og forbruk er *self-sufficiency* ( $\varphi_{SS}$ ) som defineres som andelen av last som dekkes av egenprodusert kraft, og *self-consumption* ( $\varphi_{SC}$ ) som defineres som andelen av lokal kraftproduksjon som utnyttes i bygget [132].

$$\varphi_{SC} = \frac{C}{B + C} \tag{2.9}$$

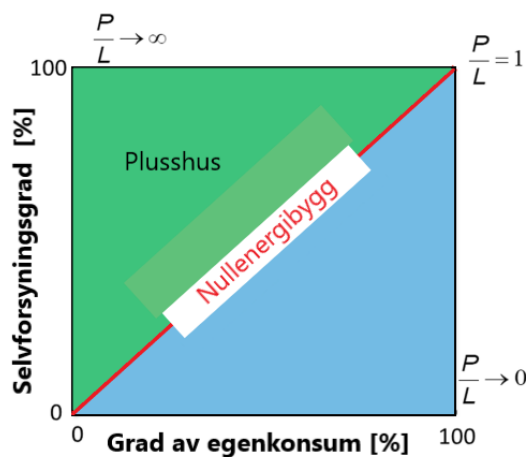
$$\varphi_{SS} = \frac{C}{A + C}$$

På norsk kan  $\varphi_{SS}$  defineres som selvforsyningsgraden og  $\varphi_{SC}$  defineres som graden av egenkonsum. De to parameterne kan uttrykkes som vist i Ligning 2.9 og er et forhold mellom arealene  $A$ ,  $B$  og  $C$  fra Figur 2.13. Areal  $A + C$  er byggets lastprofil over et døgn, areal  $B + C$  er netto kraftproduksjon og areal  $C$  er andelen egenkonsum, altså mengden egenprodusert solkraft som blir benyttet i bygget. Figuren indikerer også funksjonen til de to hovedalternativene for å øke egenforbruket: Lastforskyvning og energilagring [133].



Figur 2.13: Oversikt over daglig nettolast, nettoproduksjon og absolutt egenforbruk i et bygg med solceller. Basert på [133].

Forholdet mellom selvforsyning og egenkonsum kan visualiseres i et såkalt *energimatchingsdiagram* der forholdet mellom produksjon (P) og last (L) er gitt i Ligning 2.10. Et nullenergibygg som produserer like mye energi som det forbraker over en tidsperiode på et år vil plassere seg på linja der  $P/L = 1$  som vist i Figur 2.14 fordi  $\varphi_{SS} = \varphi_{SC}$  [132]. Et energipositivt bygg, som skal produsere mer energi enn det forbraker, må derfor oppfylle kravet  $P/L > 1$ .

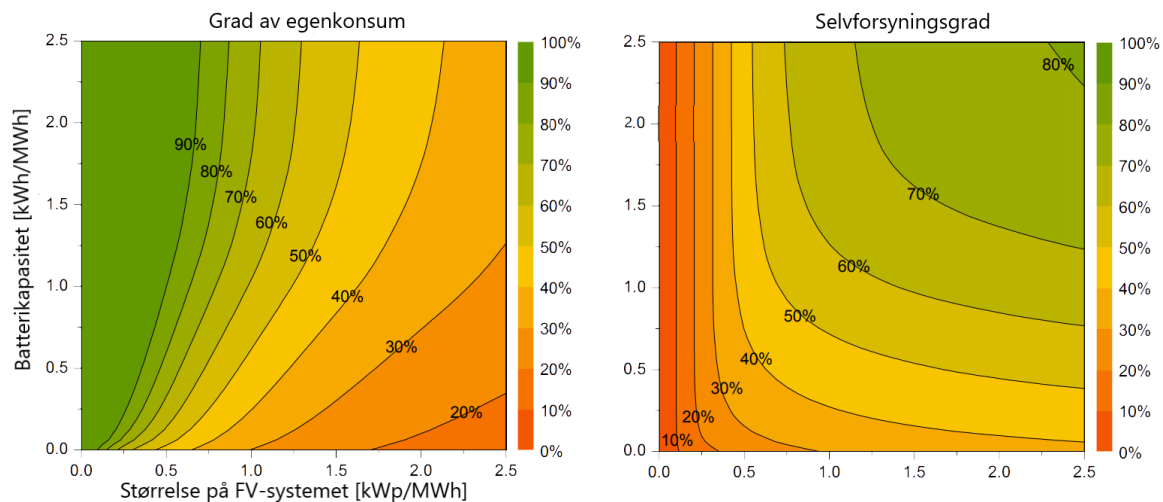


Figur 2.14: Energimatchingsdiagram. Basert på [132].

$$\frac{\varphi_{SS}}{\varphi_{SC}} = \frac{B + C}{A + C} = \frac{P}{L} \quad (2.10)$$

Med større solcellesystem øker  $\varphi_{SS}$ , mens  $\varphi_{SC}$  synker. Etter en viss størrelse vil økningen av  $\varphi_{SC}$  avta som vist i Figur 2.15, ettersom flere FV-paneler gir for stort overskudd til at all kraften kan brukes samtidig. Både  $\varphi_{SC}$  og  $\varphi_{SS}$  øker med økende batterkapasitet, men også her

vil batterisystemer over en viss størrelse ikke bidra til videre økning av verken egenkonsum eller selvforsyning som vist i Figur 2.15. Batteriet må derfor dimensjoneres etter størrelsen på solcelleanlegget i tillegg til forbruket i bygget [134]. Et overdimensjonert batterisystem vil ikke utlades fullstendig over natten. På denne måten rekker det ikke å være tomt på morgningen, og batteriets kapasitet vil ikke utnyttes til det fulle. Målet med batteriet er å maksimere  $\varphi_{SC}$  og  $\varphi_{SS}$ , og minimere andelen av forbruket som dekkes av importert kraft fra nettet.



Figur 2.15: Grad av egenkonsum og selvforsyning avhengig av størrelse på batterilager og FV-system normalisert til årlig forbruk i MWh. Basert på [134].

I følge et litteraturstudie fra Linköpings universitet i Sverige vil et solcelleanlegg med en lagringskapasitet på 0,5-1 kWh per installert effekt til FV-systemet i kW, kunne øke egenkonsumet med mellom 13 og 24 % [132]. I et studie utført av Det europeiske råd for en energieffektiv økonomi (ECEEE) ble batterikapasiteten beregnet i forhold til solcelleanleggets wattpeak, og et forhold på 1 kWh/kWp ble ansett som optimalt [135]. Et annet studie fra universitetet i Köln slår fast at en batteristørrelse på 3 kWh per kWp installert effekt er optimalt om det dimensjoneres etter FV-systemet, mens en størrelse på 2-3 kWh per 1000 kWh årlig forbruk er optimalt når det dimensjoneres etter lasten [136].

Et Belgisk studie som undersøkte hvordan andelen fornybar energi kunne økes i det nasjonale kraftnettet konkluderer med at en batteristørrelse på 1,5-2 kWh/kWp vil gi høyest utnyttelse av energien fra solcellene [137]. Endringen vil være størst fra 0,5-1,5 kWh/kWp, mens økningen vil avta fra 1,5-2 kWh/kWp. Et studie fra Aalborg Universitet fra 2020 har sett på et FV-system med batterilagringssystem for en dansk båthavn. Studiet var en del av EUs forsknings- og innovasjonsprogram *Horizon 2020*, og var en av tre studier som undersøkte *Smart Island Energy Systems*. I dette prosjektet er graden av egenkonsum maksimert, og det er installert 3,95 kWh per kWp solceller eller 2,3 kWh batteri per 1000 kWh forbruk [138].

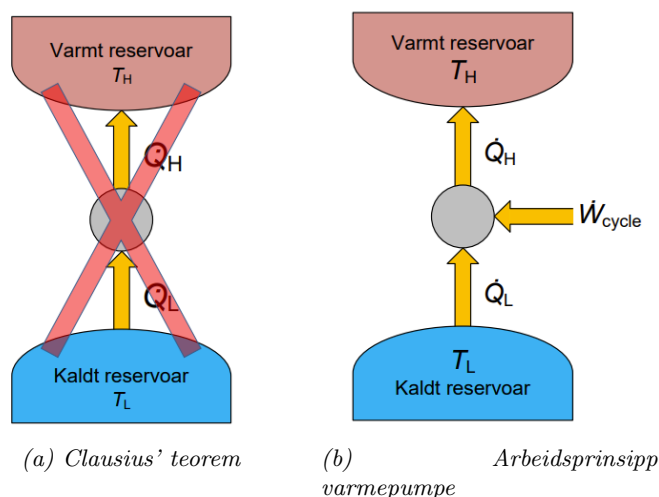
## 2.6 Varmepumper

I følge SSB var det over en million varmepumper installert i norske hjem i 2021, og salget er økende [139]. Bruken av varmepumper kan bidra til å redusere strømregningen betraktelig dersom husholdningen i utgangspunktet benytter elektrisitet som oppvarmingskilde. I Norge er dette en av hovedårsakene til at varmepumper har blitt så populære ettersom 80 % av oppvarming i norske husstander dekkes av elektrisitet [140]. Likevel er komfort, med jevn innetemperatur og automatikk, det viktigste argumentet for hvorfor nordmenn installerer varmepumper i følge en undersøkelse utført av SIFO [83]. Varmepumper blir ansett som fornybar energiteknologi da varmekildene hvor energien blir hentet fra i utgangspunktet varmes opp av sola. Varmepumper spiller derfor en viktig rolle i arbeidet med å øke energieffektivitet og implementere miljøvennlige energikilder for å nå klimamålene. EU har derfor som mål å doble utrullingshastigheten av varmepumper i løpet av de neste fem årene [141].

Varmepumper klassifiseres ut fra hvilken varmekilde den henter energi fra, og om den varmer opp luft eller vann i bygget. I Norge er luft-til-luft varmepumper det billigste og vanligste alternativet, men det finnes også luft-til-vann og væske-til-vann. De vanligste varmekildene i Norge er uteluft, bergvarme, jordvarme og sjøvann. Uteluft er tilgjengelig over alt og er den varmekilden med lavest investeringskostnad. Varmepumpen har en levetid på 12-15 år og investeringskostnaden er ofte nedbetalt i løpet av 3-6 år. Ulempen med uteluft som varmekilde er at når oppvarmingsbehovet øker på vinteren synker utetemperaturen som gjør varmepumpen mindre effektiv. Luft-til-luft varmepumper fungerer derfor aller best i kyststrøk der det er milde vintre. Væskebaserte varmepumper som baserer seg på bergvarme, jordvarme og sjøvann krever graving og boring og har derfor høy investeringskostnad, men har til gjengjeld en levetid på opptil 20 år. En væske-til-vann eller luft-til-vann varmepumpe kan brukes til både oppvarming av tappevann og romoppvarming via et vannbårent system. Fordelen med varmepumper som har væske som varmekilde er at temperaturen nede i bakken, i fjellet eller i sjøen holder en jevn temperatur hele året noe som gjør at væskebaserte varmepumper har høyere effektivitet enn luft-til-luft varmepumpe som påvirkes av kalde vintre [142].

### 2.6.1 Effektfaktor

Kort fortalt henter en varmepumpe varmeenergi fra uteluften og flytter den inn i huset som varm luft. Termodynamikkens 2. lov slår fast at varmeenergi overføres i én bestemt retning. Dette er formulert i Clausius' teorem: "Det er ikke mulig å konstruere en innretning som jobber i henhold til en termodynamisk syklus som klarer å transportere varme fra et område med lav temperatur til et område med høyere temperatur uten tilførsel av mekanisk effekt fra en ekstern kilde" som vist i Figur 2.16a [143]. En varmepumpe er derfor avhengig av tilførsel av mekanisk effekt for å kunne forflytte varme fra den kalde uteluften inn i den varmere inneluften som vist i Figur 2.16b. Varmepumpa henter varmeeffekt  $\dot{Q}_L$  fra det kalde reservoaret ved temperatur  $T_L$  og avgir varmeeffekten  $\dot{Q}_H$  i det varme reservoaret med temperatur  $T_H$ . Dette krever tilførsel av arbeid,  $\dot{W}_{cycle}$ . En varmepumpe kan også brukes til avkjøling ved å reversere prosessen.



Figur 2.16: Termodynamikkens 2. lov. Hentet fra [144].

Hvor effektivt varmepumpa klarer å overføre varme fra  $T_L$  til  $T_H$  er oppgitt ved effektfaktoren (COP) som angir forholdet mellom energien varmepumpa forbruker og varme-/kjøleeffekten den avgir. COP-faktoren for henholdsvis oppvarming og kjøling er gitt i Ligning 2.11.

$$COP_{oppvarming} = \frac{Q_H}{W_{inn}} \qquad COP_{kjøling} = \frac{Q_L}{W_{inn}} \qquad (2.11)$$

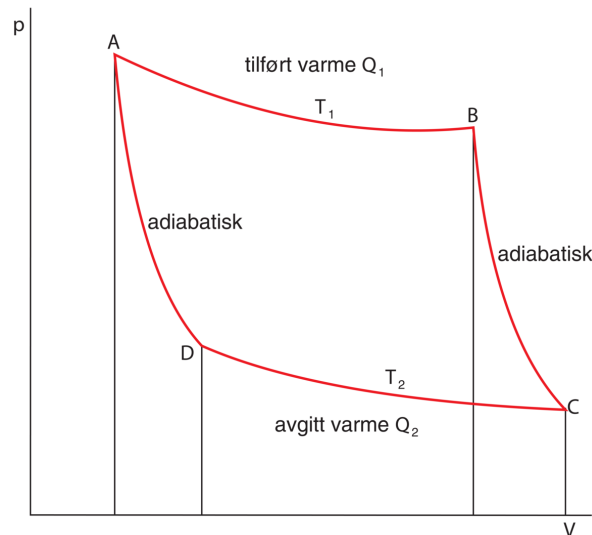
COP-faktoren må ikke forveksles med virkningsgrad, da virkningsgraden oppgis som et tall mellom 0 og 1 og aldri kan overstige 100 %. Effektfaktoren derimot kan være større enn 1. Med en COP-faktor på 3 vil varmepumpa avgir varme tilsvarende tre ganger energiforbruket. De fleste varmepumper på det norske markedet fungerer ned til  $-20^\circ\text{C}$ , men da vil COP-faktoren nærme seg 1, og varmepumpa vil ikke klare å avgir mer energi enn den bruker [143]. COP-faktoren som oppgis på varmepumper som selges i EU beregnes med en standard utetemperatur på  $7^\circ\text{C}$  og innetemperatur på  $20^\circ\text{C}$  [145]. COP-faktoren endres med temperaturdifferansen mellom inne og ute, og for å få et bedre bilde av hvor energieffektiv en varmepumpeinvestering er i løpet av et helt år benyttes årsvarmefaktoren (SCOP). SCOP er forholdet mellom mengden varmeenergi varmepumpa avgir gjennom året og hvor mye strøm varmepumpa bruker i løpet av samme år [146].

### 2.6.2 Carnotsyklusen

For å kunne beregne hva som er den høyeste teoretiske virkningsgraden til en termodynamisk prosess benyttes ideelle reversible prosesser som sammenligningsgrunnlag. Det at en prosess er reversibel betyr at den er mulig å snu på en slik måte at både systemet og omgivelsene returnerer til samme tilstand som når prosessen startet, uten å etterlate spor i systemet eller omgivelsene [143]. For å beregne den maksimale teoretiske effektfaktoren til en varmepumpe, kan en Carnotsyklus studeres. Syklusen er vist i P-V-diagrammet i Figur 2.17 studeres, og de fire delprosessene er beskrevet under.

A-B: Reversibel og isotermisk ekspansjon. Volumet øker fra A til B samtidig





Figur 2.17: Carnotsyklusen. Hentet fra [147].

som temperaturen holdes konstant. Arbeidsfluidet har temperatur  $T_1$  og absorberer varmemengden  $Q_1$  fra energireservoaret med samme temperatur.

*B-C*: Reversibel og adiabatisk ekspansjon. Arbeidsfluidet utvides og temperaturen synker til  $T_2$ .

*C-D*: Reversibel og isoterm kompresjon. Arbeidsfluidet komprimeres og temperaturen,  $T_2$ , holdes konstant ved å overføre varme til  $Q_2$ .

*D-A*: Reversibel og adiabatisk kompresjon. I siste trinn av syklusen komprimeres arbeidsfluidet uten overføring av varme til omgivelsene, dette øker arbeidsfluidets temperatur tilbake til  $T_1$ .

Sammenhengen mellom varmeeffekten overført mellom to termiske reservoarene med temperaturer  $T_H$  og  $T_L$  for en reversible prosess er vist i Ligning 2.12 og virkningsgraden for Carnotsyklusen er vist i Ligning 2.13

$$\frac{Q_L}{Q_{H \text{ rev}}} = \frac{T_L}{T_H} \quad (2.12)$$

$$\eta_{\text{carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2.13)$$

Sammenligningen av reelle irreversible prosesser med en tenkte reversibel syklus la grunnlaget for de to Carnot-prinsippene [143]:

1. Reversible prosesser gir maksimal ytelse og krever minimal energitilførsel for å oppnå ønsket ytelse. Ingen reell varmepumpesyklus kan derfor ha større virkningsgrad enn den ideelle Carnotsyklusen.
2. To reversible prosesser som utfører arbeid mellom de samme termiske energireservoarene vil ha samme termiske virkningsgrad .

På bakgrunn av disse prinsippene kan effektiviteten for en reversibel varmpumpe beregnes ved hjelp av temperaturene i de to termiske energireservoarene som vist i Ligning 2.14

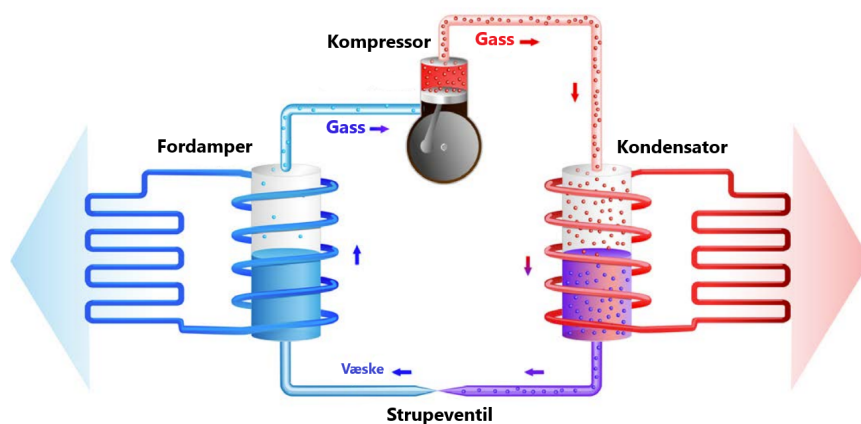
$$COP = \frac{1}{\frac{Q_L}{Q_H} - 1} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} \quad (2.14)$$

Hvor effektiv en varmpumpe er i forholdet til en ideell Carnotsyklus er oppgitt med 2. lovs virkningsgraden, og er forholdet mellom  $COP_{vp}$  og  $COP_{vp,rev}$  som vist i Ligning 2.15

$$\eta_2 = \frac{COP_{vp}}{COP_{vp,rev}} = COP_{vp} \cdot \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \quad (2.15)$$

### 2.6.3 Varmepumpesyklus

En luft-til-luft varmpumpe som brukes til oppvarming av bygg, består av en utedel og en eller flere innedeler. Jo større avstand mellom utedelen og innedelen(e), desto større tap blir det i varmpumpa som følge av varmetap i rørene [148]. Inne i varmpumpa sirkulerer et arbeidsmedium mellom kompressoren, fordamperen, kondensatoren og strupeventilen som vist i Figur 2.18. Ofte brukes det syntetiske kjølemediet R410A eller R32 som arbeidsmedium, men naturlige kjølemedier som ammoniakk eller CO<sub>2</sub> kan også benyttes [149]. Tidligere ble kuldemedier basert på klorfluorkarboner (KFK), som R12, R11, R14 og R502, mest brukt. Etterhvert ble det kjent at disse kuldemediene bidro til nedbrytingen av ozonlaget, og dette førte til at KFK-gasser ble utfaset som kuldemedie i henhold til Montrealprotokollen fra 1987 [150].



Figur 2.18: Varmepumpesyklusen. Basert på [151].

Arbeidsmediet har så lavt kokepunkt at det kan begynne å koke ved typiske utetemperaturer. Ved å komprimere kjølemediet vil gassen få så høy indre energi som følge av økt temperatur at det kan brukes til å avgi varme til huset. For at varmpumpa skal fungere må arbeidsmediet oppføre seg i henhold til tre termodynamiske prinsipper [152]:

1. Trykk-temperaturloven: Når trykket stiger vil temperaturen til arbeidsmediet øke.

2. Kokepunktloven: Når trykket stiger, vil også kokepunktet stige fordi arbeidsmediet delvis gjøres om fra gass til væske.
3. Væske-gassloven: For at arbeidsmediet skal fordampe kreves det varmeoverføring fra omgivelsene. Dette gjør at væske som fordamper avkjøler omgivelsene. Ved kondensasjon frigis varme.

Fordamperen befinner seg i varmepumpas utedel. Siden arbeidsmediet vil kunne begynne å koke allerede ved temperaturer på rundt  $-5^{\circ}\text{C}$  begynner arbeidsmediet å fordampe. Denne prosessen krever energi fra omgivelsene. Energien som arbeidsmediet absorberer fra omgivelsene fører til at omgivelsene blir kaldere og arbeidsmediet går over til gass -med temperatur på  $-5^{\circ}\text{C}$ . Denne kalde gassen entrer så kompressoren, og når volumet minsker øker trykket som igjen fører til at temperaturen stiger. Komprimeringsprosessen krever tilførsel av elektrisk energi. Den komprimerte gassen ledes deretter inn i kondensatoren hvor gassen avkjøles og kondenseres til væske. Denne prosessen avgir varme til omgivelsene. Deretter føres væsken gjennom strupeventilen hvor trykket og temperaturen reduseres, og syklusen gjentar seg [153].

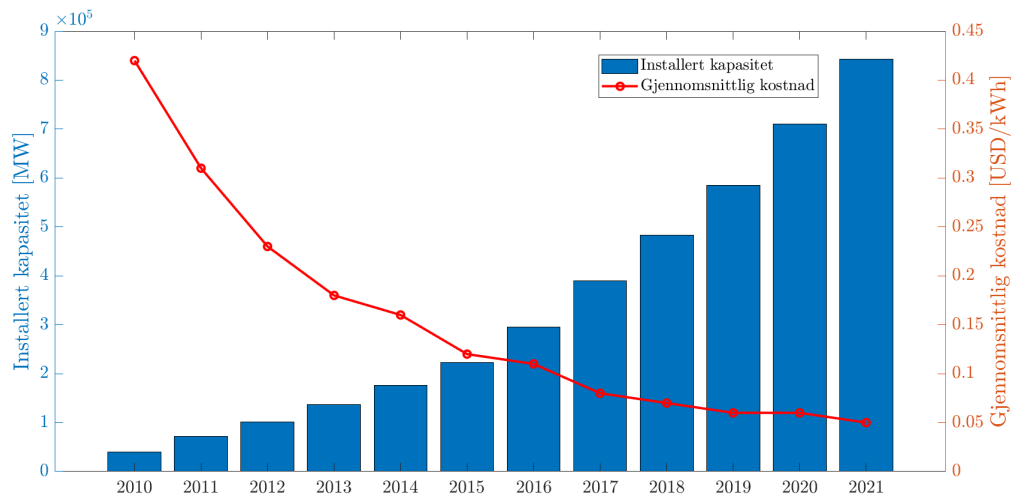
## 2.7 Solenergi

Den totale mengden solenergi som treffer jorden hvert år er nok til å dekke det årlige energiforbruket til hele verden omtrent 15 000 ganger. Solenergi er lys- og varmerstråler fra sola, og denne energien kan omformes til termisk og elektrisk energi. Solenergi som omformes til elektrisk energi kalles solkraft, og denne omformingen skjer oftest ved å bruke fotovoltaisk (FV) effekt via solceller [154]. Siden solkraft er avhengig av solinnstrålingen anses det som en variabel energikilde[155]. Som vist i Figur 2.19 er det høyest energiproduksjon fra solceller i Norge på sommerhalvåret siden det er den årstiden med mest solinnstråling. Energi fra solceller på vinterhalvåret vil i liten grad kunne dekke effekttoppene knyttet til denne årstiden, men kan bidra noe på de kaldeste dagene da det ofte er høytrykk og klarvær. Solkraft vil ha et godt samspill med vindkraft da disse energikildene har høyest produksjon i motsatte årstider [155].



Figur 2.19: Solkraftsproduksjon i Norge fra år 2020-2022. Hentet fra [112].

Solkraft er sektoren innenfor fornybar energi med hurtigst vekst for øyeblikket, og det forventes at sektoren vil fortsette å vokse i flere tiår fremover. Kostnaden for solceller har sunket med nesten 90 % de siste 10 årene og det forventes at kostnaden skal synke ytterligere [156]. Grafen i Figur 2.20 viser utviklingen av den gjennomsnittlige prisen for hver kWh produsert fra solceller fra 2010 til 2021 [157]. De blå søylene i figuren viser den globale kumulerte kapasiteten fra solceller i samme tidsperiode [158]. Figuren viser en tydelig sammenheng mellom prisen per kilowatttime og utbygging av energikilden. En av årsakene til lavere kostnader er forbedringer i teknologien knyttet til solceller, blant annet ved at solcellene har fått høyere virkningsgrad. I tillegg har utgiftene knyttet til materialbruk blitt lavere både på grunn av nye utvinningsprosesser og forbedringer av celledesignet. Nedgangen i kostnader skyldes også politiske vedtak for å stimulere solcellemarkedet [159].



Figur 2.20: Utviklingen av solcelleteknologi. Data hentet fra [158] og [157].

### 2.7.1 Solkraft i Norge

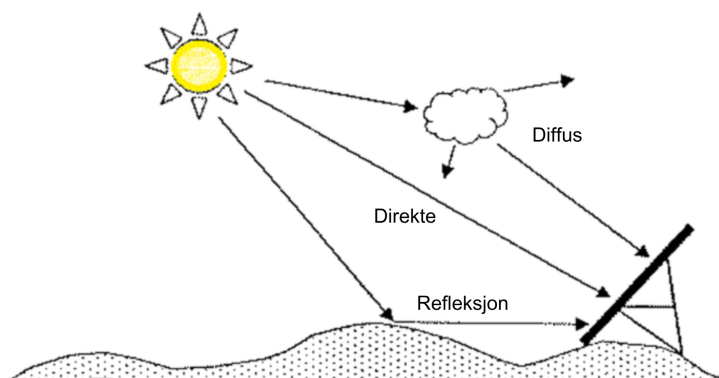
I 2022 var netto kraftproduksjon fra solceller i Norge på 60 GWh, 94,4 % mer enn i 2021. Selv om 2022 var et rekordår for solenergi, stod netto produksjon fra solkraft kun for 0,4 % av den totale kraftproduksjonen i Norge dette året. Nettoproduksjonen fra solkraft er kun den energien som har blitt matet tilbake på nettet eller registrert av Elhub. Bruttoproduksjonen fra sol er høyere enn nettoproduksjonen siden denne produksjonen også inkluderer all kraften som forbrukes lokalt der den produseres [112].

I Norge er det høyest solinnstråling på Sør- og Østlandet, men grovt estimert er solinnstrålingen i Norge på en horisontal flate mellom 600-1000 kWh/m<sup>2</sup>/år. I følge en kartlegging gjort av Multiconsult på oppdrag fra Solenergiklyngen er det tekniske potensialet for solkraft på tak og fasader på alle bygg i Norge 87,1 GWp til sammen. Dette potensialet tilsvarer en årlig kraftproduksjon på omtrent 65,6 TWh. I følge den samme rapporten har energisonen i Midt-Norge (NO3) tilgjengelig takareal på 71 millioner m<sup>2</sup> og veggareal på 9 millioner m<sup>2</sup>. Dette gir energisone NO3 et teknisk potensial for solenergi på tak og fasade på 16 GWp som tilsvarer en årsproduksjon på 12 TWh [155].

### 2.7.2 Solinnstråling

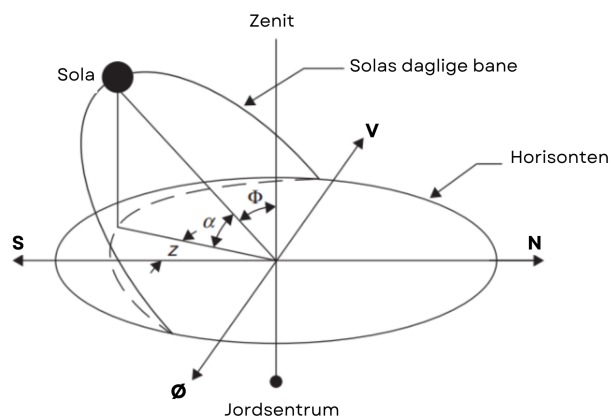
Mengden solinnstråling som treffer et gitt punkt på jorden vil variere med geografisk lokasjon, døgnetts time, årstid, det lokale landskapet og været. Direkte estimat av solenergien som treffer en overflate er ofte gitt i enheten W/m<sup>2</sup>, mens innstrålingsdata for solceller er gitt i kWh/m<sup>2</sup>. Siden jorden har en helning fra sin egen rotasjonsakse på 23,5°, vil den nordre halvkule ha mer solinnstråling på sommeren enn på vinteren. Noe av lyset fra solen vil bli absorbert, spredt og reflektert i atmosfæren før det treffer jordoverflaten på grunn av luftmolekyler, vanddamp, skyer, støv og forurensinger i lufta. Denne solinnstrålingen kalles diffus. Direkte solinnstråling er solinnstråling som når overflaten uten å bli spredt. Global solinnstråling er summen av både diffus og direkte solinnstråling [160]. Noe av sollyset vil bli reflektert fra jordoverflaten, og overflaters

evne til å reflektere sollys kalles albedo. Lyse overflater, som foreksempel snø, vil reflektere strålingen. Dette gjør at solceller også kan benytte refleksjon fra bakken til kraftproduksjon på vinteren [161]. Figur 2.21 viser de ulike typene solinnstråling som kan treffe et solcellepanel.

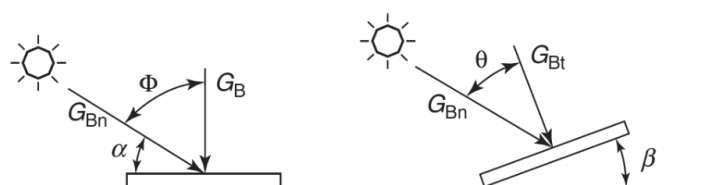


Figur 2.21: Ulike typer solinnstråling. Basert på [162].

De ulike vinklene som benyttes i beregninger av solkraft avhenger av enten solens posisjon på himmelen, eller helningen på overflaten. Noen av vinklene som benyttes er vist i Figur 2.22 og 2.23. En forklaring på hva symbolene betyr er vist i Tabell 2.4.



Figur 2.22: Solens posisjon i forhold til jordens overflate. Basert på [163].



Figur 2.23: Helningen til solcellepaneler. Hentet fra [163].

Som vist i Figur 2.22 er det en sammenheng mellom  $\alpha$  og  $\Phi$ . Denne sammenhengen kan uttrykkes ved hjelp av Ligning 2.16. Ved soloppgang og solnedgang vil  $\alpha$  være  $0^\circ$  siden solstrålene er parallelle med horisonten. For asimutvinklen,  $z$ , er det retningen ekte sør og vestover som gir positive verdier [163].

Tabell 2.4: Solinnstrålingsvinkler. (Hentet fra [163])

Begrep	Symbol	Forklaring
Solhøydevinkel	$\alpha$	Vinkelen mellom solstrålen og det horisontale planet
Zenit	$\Phi$	Vinkelen mellom solstrålen og vertikalen
Asimut	$z$	Vinkelen til solstrålene målt i horisontalplanet fra ekte sør for den nordlige halvkule
Helning	$\beta$	Helningen på overflaten i forhold til horisontalen

$$\Phi + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (2.16)$$

Det er vanlig å installere solcellepaneler med en viss helning siden dette øker mengden stråling som treffer panelet og reduserer refleksjon, sammenlignet med et horisontalt panel. Derimot finnes det mest solinnstrålingsdata for horisontale flater, og Ligning 2.17 for å beregne den direkte strålingen på vinklede flater [163]. Den direkte strålingen på en horisontal flate er gitt i Ligning 2.18. Symbolene i ligningene er hentet fra Figur 2.23.

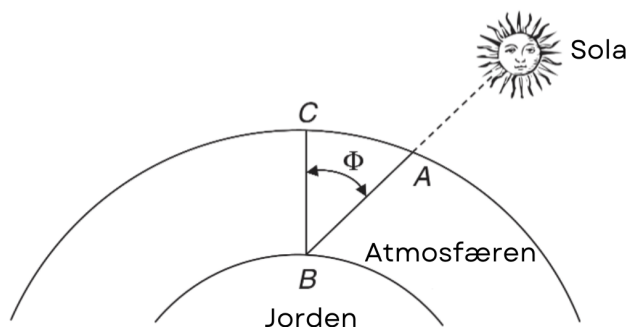
$$G_{Bt} = G_{Bn} \cdot \cos \theta \quad (2.17)$$

$$G_B = G_{Bn} \cdot \cos \Phi \quad (2.18)$$

Vinkelen på panelene vil avgjøre mengden strøm som produseres fra takmonterte solceller. På vinterhalvåret når sola står lavt på himmelen vil en brattere vinkel gi bedre strømproduksjon, mens det på sommerhalvåret vil være mest optimalt med en mindre vinkel. Et vanlig norsk boligtak vil oftest ha en takvinkel som gir en god årlig strømproduksjon. Panelenes orientering vil også påvirke produksjonen. Sørvendte paneler vil ha en høyere årlig strømproduksjon enn paneler vendt mot øst og vest. Det er også slik at sørvendte paneler vil gi produksjonstopper på midten av dagen, mens vest- og østvendte anlegg vil ha høyere produksjon tidligere på dagen og senere på kvelden. Dersom ønsket er at solcellene skal dekke deler av boligens energiforbruk, er det smart å vurdere hvor sola står på himmelen når energiforbruket er høyest [164]. En tommelfingerregel for optimal orientering av panelet er å ta  $90^\circ$  subtrahert med lokasjonens breddegrad [59].

Siden effekten levert av et solcellepanel vil variere med vinkelen på solinnstrålingen, er effekten avgitt fra solcellepaneler oppgitt i *watt peak*,  $W_p$  [165]. Watt peak er den maksimale effekten en solcelle kan levere, og gjør det enklere å sammenligne paneler fra ulike leverandører. Dersom to paneler som sammenlignes har samme areal og lokasjon, men ulik watt peak, vil panelet med høyest  $W_p$  ha høyest effektivitet [166]. Panelets watt peak beregnes under standard testforhold (STC) hvor celledemperaturen er  $25^\circ\text{C}$ , bestrålingsstyrken er  $1000 \text{ W/m}^2$  og AM er 1,5 [165]. AM står for *air mass*, eller luftmasse på norsk, og er et begrep som forklarer distansen solstrålene har beveget seg gjennom atmosfæren. AM-verdien er avhengig av zenitvinkelen uten å ta hensyn til jordens krumning som vist i Figur 2.24 og Ligning 2.19 [163]. Ved  $\text{AM} = 1,5$  er dermed zenitvinkelen,  $\Phi$ , lik  $48,19^\circ$ .

$$AM = \frac{AB}{BC} = \frac{1}{\cos \Phi} \quad (2.19)$$



Figur 2.24: Definisjonen på AM (air mass). Basert på [163].

### 2.7.3 Solcellers oppbygging og virkemåte

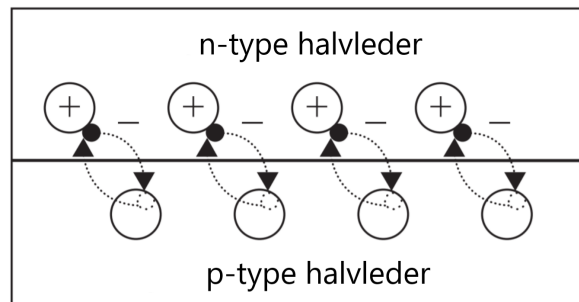
Solceller er halvledere som konverterer energi fra solstråler til elektrisitet via fotoelektrisk effekt. Et solcelleanlegg har ingen bevegelige deler og krever derfor lite vedlikehold som igjen gir anlegget en lang levetid. Et FV-system kan bygges i omtrent alle størrelser, siden det enkelt kan legges til flere moduler ved ønske om å øke den produserte effekten [167]. Solceller er oftest laget av silisium, men andre materialer som brukes er galliumarsenid (GaAs), galliumfosfid (GaP) og aluminiumfosfid (AlP) [168]. Silisium er et vanlig halvledermateriale, og det finnes store mengder av dette materialet i jordskorpen [59]. Halvledere er en gruppe stoffer som leder elektrisk strøm dårligere enn metalliske ledere, men bedre enn isolatorer [169].

Den elektriske ledningsevnen til en halvleder kan endres ved hjelp av en prosess som kalles doping for å fremkalle enten n-type halvledere eller p-type halvledere [168]. Doping er å tilsette små mengder fremmedatomer i halvlederen [169]. Silisium hører til gruppe 4 i periodesystemet, hvilket betyr at stoffet har fire elektroner i ytterste skall [167]. De vanligste grunnstoffene som silisium dopes med er bor og fosfor [170].

Dersom tilsetningsstoffene som tilsettes halvlederen har fem valenselektroner (fosfor), kalles tilsetningsstoffene donorer. Donorene vil gjøre at halvlederen oppfyller oktettregelen med et ekstra elektron slik at det dannes en n-type-halvleder [169]. Overskuddselektronene kan bevege seg rundt i krystallstrukturen til halvlederen, og dersom overskuddselektronene fjernes vil atomene i n-type halvlederen få en positiv ladning [167]. En p-type-halvleder er en halvleder dopet med akseptorer eller andre grunnstoff som har tre valenselektroner (bor). Siden det mangler et elektron for å oppfylle oktettregelen vil det oppstå hull i p-type halvlederen [169]. Disse positive elektronhullene kan bevege seg innenfor krystallstrukturen, og dersom hullene fylles av ekstra elektroner vil atomene få en negativ ladning. Ulike halvledere trenger ulik mengde energi for å få et elektron over grensesjiktet mellom p-type og n-type halvlederen (PN-overgang). Denne mengden energi kalles båndgap og for silisium er båndgapet lik 1,11 eV [167].



En illustrasjon på ekstra elektroner i p-type halvlederen og elektronhull i n-type halvlederen er gitt i Figur 2.25.



Figur 2.25: P-type og n-type halvleder. Basert på [167].

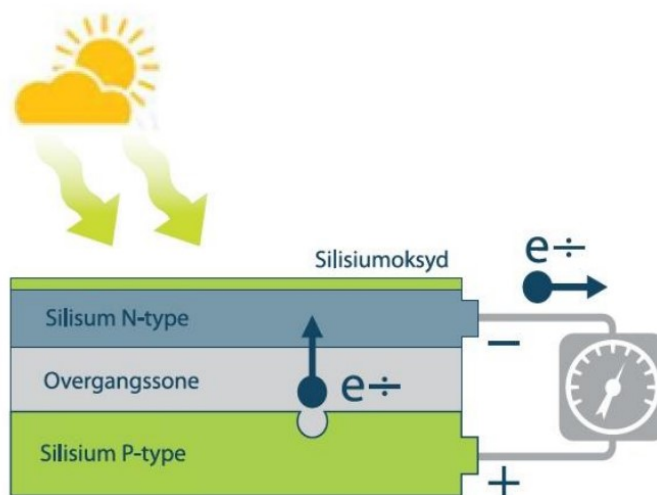
En solcelle består av et anti-refleksjonsbelegg, en n-type-halvleder og en p-type-halvleder som vist i Figur 2.26. Det er n-type halvlederen som ligger nærmest anti-refleksjonsbelegget (Silisiumoksyd i figuren), mens den p-dopede halvlederen er på undersiden. Overgangssonen er det samme som PN-overgangen og ligger mellom de ulikt dopede lagene. Anti-refleksjonsbelegget brukes for å maksimere lysmengden som går inn i cellen. Siden mørke farger er optimalt for å absorbere sollys er solcellene ofte svarte eller mørkeblå [167]. Dersom den negative og den positive siden av solcellen er koblet sammen med ledninger vil det dannes en elektrisk krets hvor det kan gå strøm [171].

Det vil derfor dannes en P-N-overgang hvor hele systemet er stabilt siden de ekstra elektronene fra p-laget vil fylle elektronhullene i n-laget. Overgangssonen vil etterhvert fungere som en barriere mellom den nå negativt ladde p-siden og den positivt ladde n-siden. Forskjellen på ladningen vil fungere som en enveis-barriere hvor elektronene kun kan flytte seg fra p- til n-laget [170].

Solenergien som treffer panelet består av fotoner slik som alt annet lys. Et foton er en masseløs elementærpartikkel som likevel innehar både energi og bevegelsesmengde [172]. Når fotoner treffer solcellen, kan de bli reflektert, absorbert eller overført. Når et foton blir absorbert av valenselektronet til et atom vil energien i valenselektronet øke med energien til fotonet. Dersom energien i fotonet er større enn båndgapet til halvlederen (1,11 eV for silisium) vil elektronet slås løs fra atomet og det vil kunne bevege seg fritt over i n-laget [167]. Når elektronene blir slått løs dannes det nye hull i p-type halvlederen og siden det er en barriere i overgangssonene er den eneste måten å flytte elektronene på å koble sammen den positive og negative halvlederen i en ytre krets. Elektronene vil dermed gå gjennom kretsen for å fylle elektronhullene og samtidig generere strøm [170]. Dersom energien til fotonet er lavere enn båndgapet til materialet blir det ikke slått løs elektroner, men energien blir omgjort til kinetisk energi som bidrar til økt temperatur i cellene [167].

#### 2.7.4 Ulike typer solceller

Atomstrukturen til en solcelle kan være monokrystallinsk, multikrystallinsk eller amorf [168, 171]. Det mest vanlige materialet i solceller er krystallinsk silisium, enten som monokrystallinsk



Figur 2.26: Oppbyggingen av en solcelle. Hentet fra [173].

eller multikrystallinsk [167]. Paneler av krystallinsk silisium stod for mer enn 95 % av den totale produksjonen fra solceller i 2021 [174]. Krystallinske materialer kjennetegnes ved at stoffet atomer, ioner eller molekyler er systematisk ordnet, og at ordenen repeteres i rommets tre retninger på en bestemt måte [175].

### Monokrystallinsk silisium

Monokrystallinske celler står for 84 % av årsproduksjonen fra krystallinsk silisium [174]. Det er denne teknologien som vil være markedsleder, helt til det utvikles en mer kostnadseffektiv teknologi med høyere virkningsgrad [176]. Som navnet tilsier består disse cellene av en enkel krystallgitterstruktur nesten uten defekter eller urenheter. Siden materialet har en høy grad av renhet har cellene en høy virkningsgrad. Ulempen med monokrystallinsk silisium er at cellene er kompliserte å produsere og dermed har høyere kostnad og tilvirkningstid enn andre teknologier [59, 167].

### Multikrystallinsk silisium

En celle laget av multikrystallinsk silisium består av flere silisiumkrystaller. For å lage en multikrystallinsk atomstruktur smeltes silisium før det størkner til en ingot [59, 167, 176]. En ingot er en støpt metallblokk som skal forarbeides videre med en form for plastisk bearbeiding [177]. Ved å størkne silisium på denne måten dannes det orienterte krystaller med fast retning i materialet. Etter dette blir ingoten kuttet i tynne skiver som kalles *wafers*. Denne solcelleteknologien har lavere virkningsgrad enn silisium med monokrystallinsk atomstruktur, men har til gjengjeld lavere produksjonskostnader [167, 176]. Virkningsgraden er lavere på grunn av en elektrisk motstand mellom krystallene i materialet som fører til spenningsfall [59].

### Amorft silisium og tynnfilm

Amorfe silisiumsolarceller er laget ved å bruke et tynt homogent lag av silisiumatomer, i stedet for å bruke en krystallinsk struktur. Fordelen til amorft silisium er at den absorberer lys mer effektivt enn krystallinske celler. Dette gjør at cellene kan være tynnere, og denne teknologien

er derfor kjent som tynnfilm [167]. Siden cellene er så tynne, er silisiumlaget ofte støttet av andre materialer som glass eller plastlaminat [59, 176]. Tynnfilmceller kan designes til å være både stive og fleksible som gjør at de kan brukes på flere underlag, eller integreres som en del av en fasade [59, 167]. I tillegg krever de tynne cellene mindre mengde materialer, som igjen gir lavere produksjonskostnader [59, 176]. Teknologiens største ulempe er virkningsgraden, som er lavere enn begge de krystallinske teknologiene [59, 167, 176]. Amorf silisium var en av de første tynnfilmteknologiene [176], men denne teknologien lages nå også av kadmium tellurid (CdTe) eller en sammensetning av kobber, indium, gallium og selenid (CIGS) [59, 176].

### 2.7.5 Faktorer som påvirker årlig produksjon fra solceller

Forventet årlig solkraftproduksjon fra et FV-system kan beregnes ved å bruke Ligning 2.20.

$$E = PR \cdot \eta \cdot A \cdot I \quad (2.20)$$

Hvor:

$E$ = årlig energiproduksjon	[kWh/år]
$PR$ = ytelsesforhold	[-]
$\eta$ = virkningsgrad	[-]
$A$ = areal	[ $m^2$ ]
$I$ = årlig solinnstråling	[kWh/ $m^2$ år]

Ytelsesforhold ( $PR$ ) er et kvalitetsmål på et solcelleanlegg, og er uavhengig av geografisk lokasjon. Ytelsesforholdet er forholdet mellom faktisk og estimert energiproduksjon som vist i Ligning 2.21. Dette forholdet angir dermed den andelen energi som er tilgjengelig til forbruk etter for eksempel varme- og ledningstap.  $PR$  verdier går fra 0-1 eller fra 0 %-100 % og jo nærmere 1, eller 100 %, desto mer effektivt er systemet.

$$PR = \frac{\text{Faktisk produksjon}}{\text{Estimert produksjon}} \quad (2.21)$$

Virkningsgraden til en solcelle er gitt i Ligning 2.22 hvor  $\eta$  er definert som forholdet mellom den produserte effekten fra cellen og solinnstrålingseffekten [178]. Monokrystallinsk silisium gir en virkningsgrad på mellom 18-22 %, multikrystalinsk silisium har virkningsgrader mellom 14 og 18 % og tynnfilmceller har en virkningsgrad på 10-12 % [168]. Den øverste teoretiske grensen for virkningsgraden til solceller med dagens teknologi er på omtrent 28 % [179]. En av årsakene til at virkningsgraden for solceller er relativt lav er at det kun er et elektron som frigjøres fra atomene, uavhengig av hvor mye større fotonenergien er enn båndgapet til halvlederen [167].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inn}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{P_{inn}} \quad (2.22)$$

Hvor:

$$\begin{aligned}\eta &= \text{virkningsgrad} \\ P_{maks} &= \text{maksimal effekt produsert} \\ P_{inn} &= \text{innstrålt effekt fra sola} \\ I_{maks} &= \text{strøm} \\ V_{maks} &= \text{spenning}\end{aligned}$$

I tillegg til orientering og helning på panelene vil skygge, tilsmussing og cellenes temperatur også påvirke produksjonen fra solcellepanelene. Skyggetap forekommer når solcellepanelene er skyggelagt fra bygninger, trær eller andre objekter i nærheten som reduserer solinnstrålingen på panelene. Tap som følge av tilsmussing forekommer når snø, smuss, støv, pollen og andre partikler dekker overflaten til solcellene. Ytelsen til et solcellepanel reduseres med en økende grad av tilsmussing, og ved snøfall kan det forekomme at panelene ikke produserer energi i det hele tatt [180]. Tilsmussingstapene er ofte neglisjerbare dersom helningsvinklene er større enn  $20^\circ$  og det er regelmessig nedbør på lokasjonen slik at panelene vaskes [181]. Siden solceller testes under STC-betingelser vil panelene produsere mindre enn oppgitt effekt dersom temperaturen på lokasjonen overgår  $25^\circ\text{C}$  [182]. Driftstemperaturen har en stor innvirkning på konverteringen fra lys til elektrisitet, og både den elektriske virkningsgraden og produserte effekten er lineært avhengig av driftstemperaturen [183].

### 2.7.6 Fra celle til anlegg

Cellene kan kobles i serie eller parallell for å optimalisere mengden produsert kraft, og for å justere effekt, spenning og strøm til de andre komponentene i solcelleinntallasjonen [178]. Dersom cellene er koblet i serie optimaliseres spenningen, mens strømmen optimaliseres når cellene er parallellkoblet [59]. Cellene er den minste bestanddelen i et solcelleanlegg, og når flere celler kobles sammen kalles det en modul. Et solcellesystem består av moduler, vekselretter, elektriske komponenter og monteringsystemer [184]. Solceller kan installeres på tak og fasader på bygninger, integreres som en del av bygningen, eller monteres på bakken [178]. Et FV-system kan både levere strøm til nettet, eller være frittstående som betyr at det ikke er tilknyttet strømmettet. Siden strømmen som produseres fra solkraft ikke alltid forbrukes i det øyeblikket den blir produsert, må energien lagres. Frem til idag har blyakkumulator-batterier vært den mest brukte teknologien, men denne utfordres nå av utviklingen av nye batteriteknologier [179].

Solcellene vil produsere likestrøm (DC) og for at denne strømmen skal kunne brukes i det norske elektrisitetssystemet må den omformes til vekselstrøm (AC). Omformingen gjøres i en komponent som heter vekselretter eller inverter, og denne komponenten bidrar også til optimal drift av solcellesystemet. Dersom kraftproduksjonen skal kobles til et kraftnett må kraften oppfylle visse kriterier som sikrer at kraften blant annet har riktig frekvens og spenning. Siden det er nettselskapene som er ansvarlige for kvaliteten på deres nett, er det de som bestemmer

hvilke tilknytningskriterier som gjelder på nettet [185]. Vekselretteren kan levere både enfase- og trefasestrøm [167]. Det vil være noe tap av energi i omgjøringsprosessen fra DC til AC, slik at virkningsgraden til inverteren er lavere enn 100 % [59].

En av grunnreglene for valg av vekselretter er i følge solcelleleverandøren OTOVO å underdimensjonere vekselretteren i forhold til solcelleanleggets topp effekt. Hvor mye vekselretteren burde underdimensjoneres er avhengig av klimaforholdene på lokasjonen, og i Norge anbefaler OTOVO at det er installert 15-20 % mer effekt i anlegget enn i vekselretteren. Årsaken til underdimensjoneringen er at de fleste anlegg sjelden oppnår oppgitt makseffekt, og det vil derfor gi større tap med en vekselretter dimensjonert etter den oppgitte effekten. OTOVO anbefaler også at det bør være en vekselretter per bygning. Vekselrettere har en levetid på mellom 10-20 år, som er kortere enn levetiden til de fleste solcellepaneler [186].

Det kan benyttes både stringvekselretter og mikrovekselretter for strømkonverteringen. Dersom hvert av panelene har en egen vekselretter kalles det mikrovekselretter, mens en stringvekselretter brukes når flere paneler er koblet sammen. Ulempen med stringvekselrettere er at alle panelene i samme serie må produsere på den samme spenningen. Dersom et av panelene koblet i serie blir skyggelagt og dermed får lavere effektproduksjon, vil effektproduksjonen til de andre panelene i serien også reduseres. Ved bruk av mikrovekselretter er ikke skyggelegging eller lignende hendelser et problem. Generelt har stringvekselrettere høyere virkningsgrad med opp til 98 % sammenlignet med virkningsgraden til en mikroinverter som er på 90-95 %. Mikrovekselrettere er også vanskeligere å vedlikeholde, men har lengre levetid enn stringvekselrettere [59].

### 2.7.7 Barrierer mot solkraft

Det finnes flere barrierer mot utbygging av solkraft i Norge. En av utfordringene knyttet til vekst innad i landet er at det er mangel på kunnskap og fagfolk innenfor solenergi. Usikkerheten knyttet til lønnsomheten av utbyggingen er også en hindring. Lønnsomheten er avhengig av innkjøpspris på systemet og prisen på kraft. Siden det norske regelverket stopper deling av overskuddskraft er det ikke lønnsomt å dimensjonere installasjonen større enn til eget forbruk, og dette vil føre til at takflatene ikke utnyttes optimalt. Det er også utfordringer knyttet til andre regelverk som TEK, PBL, energiloven og regelverk fra EU. En storskala utbygging av nettilkoblet solkraft vil også være problematisk med tanke kraftnettets kapasitet. I tillegg vil konsesjonsprosessen for disse anleggene være både kostbar og tidkrevende [155].

### 3 Casestudie - Karinelund

Casestudien skal undersøke om Karinelund studentby kan bli et energipositivt nabolag. Denne seksjonen vil først gi en beskrivelse av nabolaget og boligene som undersøkes. Deretter vil metodene som er brukt forklares og resultatene fra beregningene presenteres i rekkefølgen: U-verdiberegning, varmepumpeberegning og simulering av FV- og batterisystem. Det vil beregnes hvor mye installasjon av varmepumper kan redusere energiforbruket i boligene, hvor mye energi som kan produseres ved å installere solcellepaneler på takene og hvilken batteristørrelse som egner seg best til å lagre denne solenergien. Til slutt presenteres fire ulike scenarier for nabolaget og resultatene fra disse, samt et grovt overslag for hvor mye investeringene vil koste.



Figur 3.1: Karinelund Studentby. Hentet fra [187].

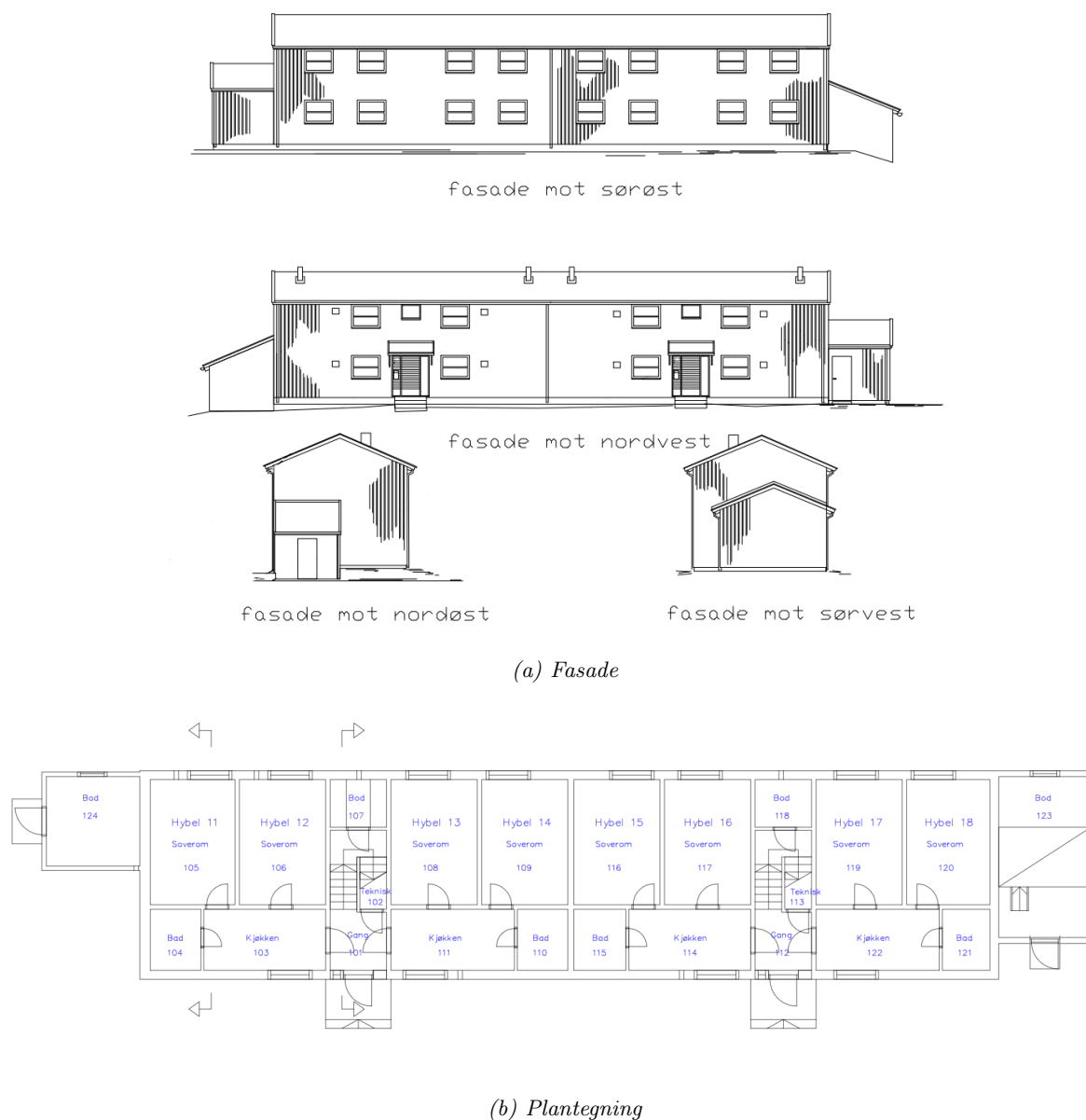
#### 3.1 Systembeskrivelse

Nabolaget som undersøkes i denne oppgaven er Karinelund studentby, heretter omtalt som Karinelund. Figur 3.1 viser et flyfoto av Karinelund hentet fra Google Earth. Studentbyen eies og driftes av Studentskipnaden i Trondheim (Sit). Tomten er på et mål, og er registrert i eiendomsregisteret med bruksnavnet Karinelund 2, gårdsnummer 53 og bruksnummer 150. Nabolaget huser 112 studenter og består av sju toetasjes boligbygg med sykkelbod, et mellombygg for renseanlegg, en grillhytte og en studenthage.

##### 3.1.1 Boligene

Hvert bygg har to oppganger med fire leiligheter tilhørende hver oppgang. En tegning av fasadene til bolig 149 er vist i Figur 3.2a. De seks andre byggene er identiske med unntak av sykkelbodenes plassering. Plantegning av førsteetasje er vist i Figur 3.2b. Hver leilighet inneholder to soverom på  $12 \text{ m}^2$ , og sammen med felles kjøkken og bad er arealet av hver av leilighetene  $36,5 \text{ m}^2$ . Hvert bygg har et samlet bruksareal (BRA) på  $292 \text{ m}^2$ . Det har ikke vært mulig å oppdrive en byggt teknisk tegning med eksakte mål på boligene. Sit har gitt tilgang til tegningen vist i Figur 3.2a, og det er antatt at denne har reelle størrelsesforhold. For å beregne lengdene til boligene er det derfor tatt mål av boligens kortvegg, dører og vinduer med meterstokk. Deretter er disse

målene brukt til å finne forholdet mellom avstandene på tegningen og avstandene i virkeligheten slik at det er mulig å beregne de resterende lengdene. Målene som er brukt i videre beregninger er presentert i Tabell 3.1.



Figur 3.2: Tegning av bolig 149. Oppgitt av Sit.

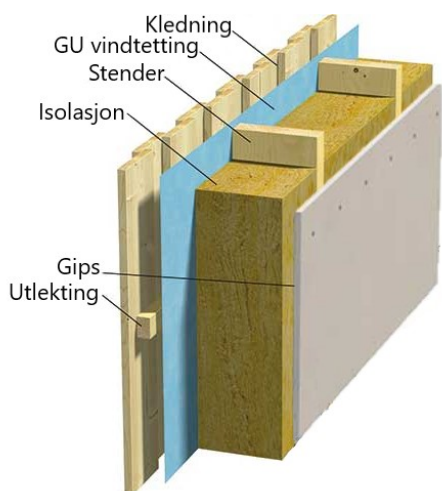
Boligene ble oppført i 1986, og bortsett fra nye strøk med maling er det ikke gjort andre utvendige oppgraderinger enn å bytte takpapp i 2015. I 2021 ble bad og kjøkken renoverert innvendig. Siden TEK-85 gjaldt fra årsskiftet 85/86, og byggene er oppført i 86, er det antatt at Karinelund følger kravene i TEK-85. Figur 3.3a viser en illustrasjon av boligens yttervegg basert på informasjon oppgitt av Sit. Materialenes tykkelse og konduktivitet er presentert i Tabell 3.2. Den termiske motstanden i de ulike materialene er beregnet ved å dele tykkelsen i meter på den termiske konduktiviteten. Den termiske motstanden for luftrommet mellom lektene er hentet fra norsk standard *NS-EN ISO 6946:2017* [188].

Stenderne i isolasjonslaget er antatt å være 48 mm brede og ha en avstand mellom hverandre på

Tabell 3.1: Mål på bygg

Bygningsdel	Mål
Lengde	29 m
Bredde	7 m
Gesimshøyde	5,6 m
Mønehøyde	7,086 m
Takvinkel	23°
Takutstikk kortsida	0,1 m
Takutstikk langsida	0,5 m
Pipe	1 × 1 × 1 m

600 mm, senter til senter. Disse verdiene brukes i veiledning til TEK-85. I følge forskriften fra 1985 kan treandelen for et hus som benytter slike stendere settes lik 10 % av veggens areal. Det er også antatt at lektene har en bredde på 48 mm og at mineralullen som benyttes som isolasjon har en konduktivitet på 0,037 W/mK basert på tall fra TEK-85. For stående kledning brukes horisontale lekter. For å sikre fri drenering og sammenhengende ventilering bak kledningen monteres lektene på vertikale sløyfer som vist i Figur 3.3b. For å forenkle beregningen av den totale U-verdien til veggen er det antatt at det bare er brukt lekter, og at disse er vertikale. Informasjonen fra Sit angir bare tykkelsen på utlektingslaget, og inkluderer ikke informasjon om hvor tykke lektene er i forhold til sløyfene. Det antas at forholdet mellom lekter og luft i veggen vil være likt uavhengig av om lektene er vertikale eller horisontale.



(a) Tverrsnitt yttervegg. Basert på [189].



(b) Sløyfer og lekter. Hentet fra [190].

Figur 3.3: Veggkonstruksjon.

For å beregne den totale U-verdien er det benyttet metoden beskrevet i norsk standard *NS-EN ISO 6946:2017*. Først beregnes den totale termiske motstanden i ytterveggen. Den øvre og nedre termiske resistansen beregnes ved hjelp av henholdsvis Ligning 2.7 og 2.8 som beskrevet i Kapittel 2. De respektive resistansene blir da 2,95 og 2,82 m<sup>2</sup>K/W. Den totale termiske resistansen er gjennomsnittet av den øvre og nedre resistansen og blir 2,88 m<sup>2</sup>K/W. U-verdien for ytterveggen beregnes ved å ta invers av den totale resistansen og blir 0,3468 ≈ 0,35 W/m<sup>2</sup>K. Sammenlignet



Tabell 3.2: Materialene i ytterveggen med tilhørende termisk konduktivitet og resistanser. (Hentet fra [61, 191, 192])

Sjikt	x [mm]	k [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]	Nr.	Kommentar
Ekstern overflate			0,04		
Kledning	19	0,12	0,16	1	
Utlekking	47	0,12	0,39 0,18	2a 2b	Trelekt Luft
GU vindtetting	9,5	0,21	0,05	3	
Bindingsverk	100	0,12 0,037	0,83 2,7	4a 4b	Stender Isolasjon
Gips	13	0,25	0,05	5	
Intern overflate			0,13		

med dagens minstekrav på 0,22 W/m<sup>2</sup>K er det en forskjell på 0,13 W/m<sup>2</sup>K. Ved å etterisolere med 8,6 cm mineralull med en konduktivitet tilsvarende dagens standard på 0,032 W/mK kan det oppnås en U-verdi på 0,18W/m<sup>2</sup>K. Dette er ikke medregnet påføring i det nye isolasjonslaget.

Boligene har trelagsvinduer produsert i 1985. Det antas dermed at byggene følger kravene til alternativ 1 for småhus i Tabell 2.1 med U-verdi for yttervegg og vindu på henholdsvis 0,35 W/m<sup>2</sup>K og 2,1 W/m<sup>2</sup>K. I TEK-85 er småhus definert som "Frittliggende eneboliger og tomannsboliger samt småhus i grupper og sammenbygd i kjeder, rekker m.v. i høyst to etasjer" [34].

For å beregne energibesparelsen fra utskiftning av vinduer benyttes Ligningen 2.6a. Ved å bytte fra vinduer med U-verdi på 2,1 W/m<sup>2</sup>K til vinduer med U-verdi på 0,8 W/m<sup>2</sup>K kan det spares 266,7 kWh/år per vindu. Beregningene er gjort for utetemperaturer i 2022, arealet av vinduene er 1,7 m<sup>2</sup> og innnetemperaturen er satt til 20°C.

### 3.1.2 Energiforbruk

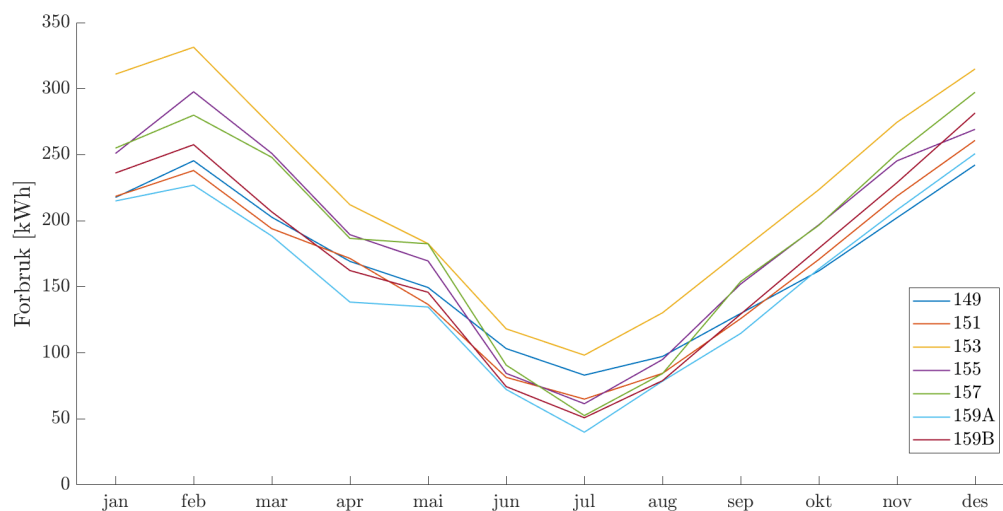
Ingen av boligene har installert vaskemaskin da beboerne benytter seg av et fellesvaskeri i en annen studentby. Det er heller ikke tilrettelagt for elbillading i boligene, som er en kilde til høyt forbruk i andre privatboliger som vist i Figur 2.3a. Av teknisk utstyr har leilighetene kjøleskap, fryser, komfyr og taklamper som standard inventar. Alle boligene kan ha mer teknisk utstyr avhengig av hva studentene har tatt med selv. Det er ikke installert et mekanisk ventilasjonssystem i boligene, men mellom hvert rom i leiligheten er det en ventilasjonsluke på cirka 10×30 cm. All oppvarming i boligene er elektrisk oppvarming via panelovner. Det er en ovn på hvert soverom, en på kjøkkenet og en på badet. Beboerne har prisen for strøm inkludert i leieprisen. Siden studentbyen består av eldre bygg som ikke har blitt nevneverdig energioppgradert og oppvarmingen utelukkende kommer fra panelovner, vil boligene få energikarakter G og oppvarmingskarakter rød.

Selv om Trondheim har hatt fjernvarme siden 1986 har ikke Karinelund tilknytning til fjernvarmeledningen (i oransje) som vist i Figur 3.4 [193]. Det er likevel en mulighet at Karinelund kan koble seg til fjernvarmenettet i fremtiden.



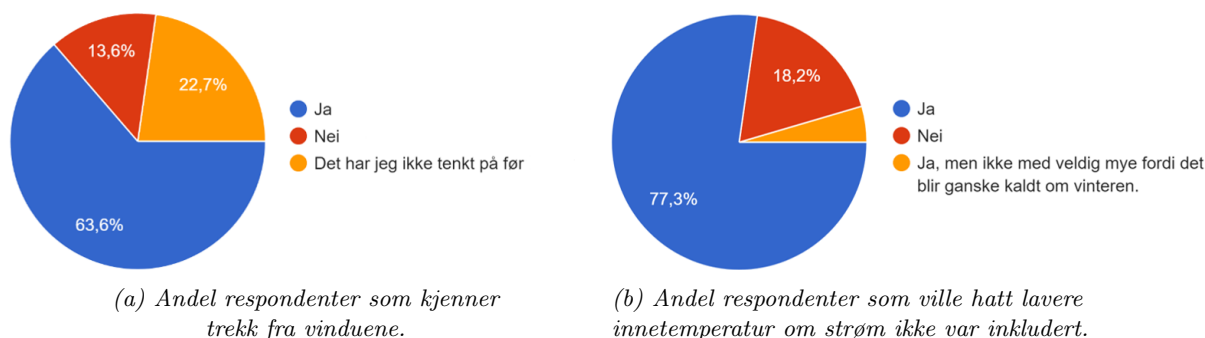
Figur 3.4: Kart over fjernvarmeledninger ved Karinelund. Hentet fra [194].

Sit har oppgitt forbruksdata for hver time i året fra 1. januar 2022 til 31. desember 2022 for alle boligene. Siden forbruket er oppgitt, er det ikke foretatt beregninger på varmetapet ved å bruke teorien som beskrevet i Kapittel 2.3.1 og 2.3.2. Figur 3.5 viser de forskjellige husene sitt energiforbruk per måned over 2022. Figuren viser at boligene i Karinelund har svært ulikt forbruk, men følger de samme trendene på sommeren og vinteren. Figuren viser at det er bolig 153 (gul) som har det høyeste energiforbruket for hver måned, med god margin ned til neste bygg alle måneder bortsett fra mai. Differansen i årsforbruk mellom 153, som er bygget med høyest forbruk, og 159A, som har lavest forbruk, var i 2022 på cirka 24 700 kWh.



Figur 3.5: Årsforbruk for hvert hus.

For å få informasjon om beboerferd ble det utført en enkel spørreundersøkelse med 22 respondenter. Spørsmål 1 var om beboerne kjente trekk fra vinduene med alternativene ”ja”, ”nei” og ”det har jeg ikke tenkt på før”. Spørsmål 2 var om beboerne ville hatt lavere innetemperatur hvis strømforbruk ikke var inkludert i husleien med alternativ ”ja”, ”nei” og ”annet” der respondentene kunne fylle inn sitt eget svar. Svarene som omhandlet trekk fra vinduene er vist i Figur 3.6a og Figur 3.6b presenterer prosentandelen som hadde endret innetemperaturen dersom strømforbruket ikke var inkludert i leieprisen.



Figur 3.6: Resultater fra spørreundersøkelse.

## 3.2 Varmepumpeberegning

For å senke nabolagets energiforbruk, er det undersøkt hvor stor energibesparelse som kan oppnås ved å installere varmepumper i boligene. Siden det er åtte leiligheter i hvert bygg, vil det kunne bli mye støy og estetisk forstyrrende å installere en varmepumpe i hver leilighet. Det er derfor valgt å benytte en varmepumpe med fire innedeler. Disse burde plasseres over hver av ytterdørene, for å minimere rørlengden. Beregningen er foretatt i programvaren MATLAB R2020b, som er basert på programmeringsspråket *C* og brukes til plotting, matriseregning og implementering av algoritmer [195].

### 3.2.1 Antagelser

I varmepumpeberegningene er det antatt at hver av leilighetene er ett areal, og det er dermed ikke tatt hensyn til at det er vegger og dører mellom rommene i leilighetene. Varmepumpa vil da stå for hele oppvarmingsforbruket til alle rommene i boligene. Det er også antatt at byggets totale forbruk kan deles likt på de åtte leilighetene.

Romoppvarmingsandelen av det totale strømforbruket fra 2022 er satt til 67 % [54]. Denne verdien er valgt siden forbruket i studentbyen ikke inneholder elbillading eller vaskemasin og tørketrommel, og 67 % var den høyeste oppgitte verdien fra kildene gitt i Kapittel 2.3.

Det er antatt at varmepumpa kun brukes til oppvarming av boligen, og ikke til avkjøling da det ikke er et nevneverdig kjølebehov i Trondheim. Det er antatt at det ikke er et oppvarmingsbehov de dagene i året hvor gjennomsnittstemperaturen i døgnet er på 17°C eller høyere. Grensen er satt til 17°C da dette brukes som basistemperatur i de nordiske landene for å beregne oppvarmingsbehovet ved hjelp av graddagstallet. Graddagstallet for et døgn er differansen mellom basistemperaturen og gjennomsnittstemperaturen det døgnet. Med en basistemperatur på 17°C er det antatt at man vil oppnå en ønsket innetemperatur på rundt 20°C på grunn av varmetilskudd fra personer og elektrisk utstyr [196].

### 3.2.2 Valg av varmepumpe

Siden denne rapporten ikke fokuserer på økonomisk gunstighet, er varmepumpa valgt med bakgrunn i varmepumper som selger godt på det norske markedet. Leverandøren Toshiba er valgt på grunnlag av utviklingen av ”hyper-heater”-modeller som fungerer godt for norske forhold der

temperaturen kan bli lavere enn  $-15^{\circ}\text{C}$ . Inne delen Toshiba multisplitt Polar er valgt over de andre inne delene da den vil ta opp minst plass inne, i tillegg til å være folkefavoritten i følge Toshiba selv. Modellen har blitt fabrikktestet ned til  $-20$  grader [197].

Det var bare mulig å finne COP-verdier ved ulike temperaturer for varmepumpa med to inne deler. SCOP-verdien for to inne deler er 4,4, mens SCOP-verdien for fire inne deler er 4,26. Den nominelle COP-verdien for to inne deler er på 4,71, mens den nominelle COP-verdien for fire inne deler er på 4,67. Siden den nominelle COP-faktoren bare varierer med 0,04, altså mindre enn 1 %, benyttes COP-verdiene for to inne deler i beregningene. Verdiene for COP og installert effekt (PI) for varmepumpa er vist i Tabell 3.3. COP-verdiene i tabellen er hentet fra databladet for varmepumpen med 2 inne deler, mens TC- og PI-verdiene er fra databladet for fire inne deler.

Tabell 3.3: COP og effekt varmepumpe. (Hentet fra [198, 199])

Grader $^{\circ}\text{C}$	COP	TC [kW]	PI [kW]
15		10.83	2.07
12	7.03		
10		9.81	1.99
7	5.56		
6		9.00	1.93
2	4.40		
0		7.78	1.83
-5		6.77	1.75
-7	3.31		
-10		5.75	1.67
-15	2.8	4.74	1.59

### 3.2.3 Klimadata

Temperaturdataene brukt i varmepumpeberegningen er hentet fra Norsk klimaservicesenter [200]. Dataene har timesoppløsning fra 1.januar 2022 til 31. desember 2022 og kommer fra målestasjonen Trondheim-Voll. Dette er den målestasjonen som er geografisk nærmest Karinelund studentby.

### 3.2.4 Matlab-beregning

Scriptet inneholder flere antagelser, men kan til gjengjeld benyttes for ulike typer husholdninger siden det bare er behov for informasjon om temperatur, forbruk, COP-verdier og tilført effekt. Det er ikke tatt hensyn til tap i varmepumpa, bortsett fra tapene som allerede er inkludert i verdiene fra databladet.

Siden en av antagelsene er at det ikke er et oppvarmingsbehov når middeltemperatur er over  $17^{\circ}\text{C}$ , er det første steget i scriptet å sammenligne gjennomsnittstemperaturen for hvert døgn med  $17^{\circ}\text{C}$ . Dersom gjennomsnittstemperaturen er lavere enn  $17^{\circ}\text{C}$  returneres 0,67 til en vektor med romoppvarmingsgraden. Hvis gjennomsnittstemperaturen er  $17^{\circ}\text{C}$ , eller høyere, returneres 0 til vektoren med romoppvarmingsgraden.

Verdiene for COP og PI fra databladene er kun gitt for visse utetemperaturer. Det er derfor brukt lineær interpolasjon og ekstrapolasjon med hensyn på utetemperaturen for å tildele en COP- og PI-verdi til hver time i året. Siden det skal være to utedeler på hvert bygg må hver varmpumpe kunne dekke halvparten av byggets forbruk. Forbruksvektoren for hvert bygg er derfor delt på to. For å kunne beregne  $W_{inn}$  brukes sammenhengen mellom COP,  $W_{inn}$  og  $Q_H$  som vist i Ligning 2.11. For å finne mengden energi som varmpumpa må dekke,  $Q_H$ , er det oppgitte timesforbruket multiplisert med romoppvarmingsgraden. Energien som kreves for å drifte varmpumpa,  $W_{inn}$ , beregnes ved å dividere  $Q_H$  på COP-vektoren. I timene hvor  $W_{inn}$  er større enn PI oppgitt i databladet må det benyttes andre varmekilder for å dekke varmebehovet. I Karinelund er denne varmekilden panelovner. Det nye årsforbruket etter installasjon av varmpumper er beregnet ved å legge sammen energien varmpumpa trenger, forbruket som må dekkes av panelovnene og det resterende forbruket knyttet til annet elektrisk utstyr. For å finne det totale forbruket til hver av bygningene multipliseres det nye årsforbruket med to siden utregningen av beskrevet ovenfor kun er for en utedel og en oppgang. Besparelsen beregnes ved å ta det opprinnelige forbruket subtrahert med det nye forbruket.

### 3.2.5 Resultater fra varmpumpeberegning i Matlab

Resultatene fra varmpumpeberegningen for hver av boligene er vist i tabell 3.4. Matlab-scriptet som er brukt ligger i Vedlegg A.

Tabell 3.4: Resultater fra varmpumpeberegning

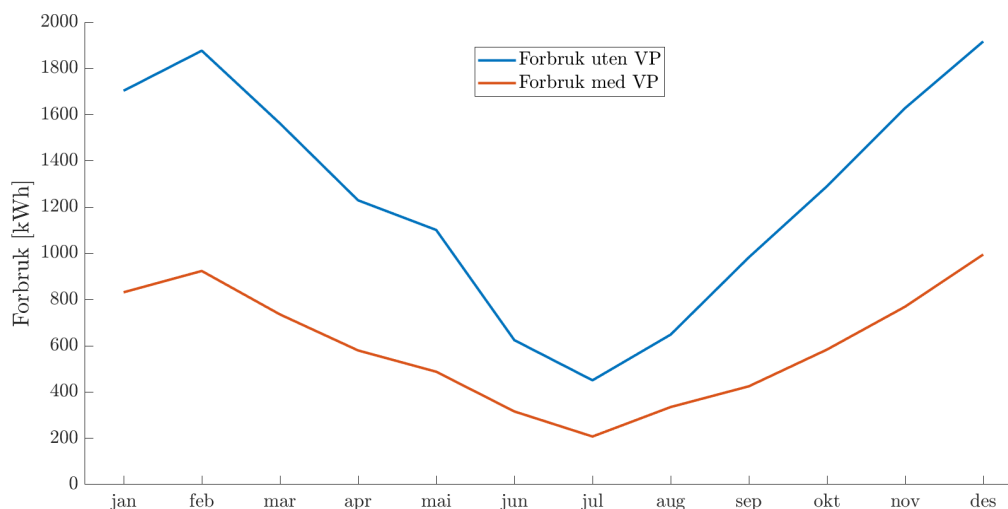
Bolig	149	151	153	155	157	159A	159B
Årsforbruk u. VP [kWh]	60 913	59 808	80 433	68 912	69 327	55 780	61 772
Forbruk panelovn [kWh]	17,97	14,38	57,61	46,46	51,52	16,74	43,98
Årsforbruk m. VP [kWh]	29 209	28 650	38 525	32 952	33 168	26 730	29 574
Besparelse [kWh]	31 704	31 158	41 909	35 960	36 159	29 049	32 198
Besparelse [%]	52,05	52,10	52,10	52,18	52,16	52,08	52,12

Verdiene gitt i raden med *Forbruk panelovn* er forbruket som overskrider den oppgitte tilførte effekten til varmpumpa, og dermed må dekkes av en annen oppvarmingskilde. Bolig 153 vil trenge mest oppvarming fra panelovner, etterfulgt av bolig 157 og 155. Bygg 151 vil kun trenge 14,38 kWh med varme fra panelovn.

Bolig 155 har den høyeste prosentvise besparelsen, men det er 153 som har den høyeste besparelsen i kilowattimer siden dette bygget har høyest forbruk i utgangspunktet. Det er også testet ulike verdier for romoppvarmingsandelen. Dersom andelen reduseres til 0,53 blir den prosentvise besparelsen for bygningene omtrent 41 %. Dette gir en besparelse på omtrent 11 % mindre enn resultatene vist i Tabell 3.4.

Figur 3.7 er en fremstilling av forbruket til Karinelund studentby før og etter installasjon av

varmepumper. Den blå grafen er det totale forbruket for alle syv boligene per måned i 2022, mens den røde grafen viser nabolagets forbruk dersom varmepumper installeres. Arealet under den blå grafen tilsvarer et forbruk på 456 945 kWh, mens årsforbruket med varmepumper er på 218 807 kWh. Studentbyen vil kunne spare omtrent 230 000 kWh/år ved å installere varmepumper i hvert bygg. Dette tilsvarer 52 % av strømforbruket i 2022. Besparelsen er størst i vintermånedene.



Figur 3.7: Endring i studentbyens månedsforbruk med og uten varmepumpe.

Dersom boligene i studentbyen skal oppfylle kravene for nZEB på  $86 \text{ kWh/m}^2 + 1600/\text{m}^2$ , vil det maksimale forbruket for hele Karinelund være omtrent 175 800 kWh/år. Forbruket for 2022 er 281 200 kWh for høyt i forhold til nZEB-kravene. Etter installasjonen av varmepumper er forbruket fortsatt for høyt med omtrent 43 000 kWh. Forbruket for nZEB for ett enkelt bygg er cirka 25 100 kWh, og huset som er nærmest å oppfylle kravet er bolig 159A hvor det kun brukes i overkant av 1600 kWh for mye energi per år.

### 3.3 Beregning av solenergipotensielle

Oppgaven baserer seg på at forslaget om en ny plusskundeordning vedtas, slik at det blir mulig å dele strøm mellom husstander som har samme bruksnummer. Med gjeldende regelverk måtte hvert tak vært delt inn i åtte ulike FV-systemer dersom hver leilighet skulle hatt egenproduksjon.

Programvaren som er benyttet for å gjennomføre simuleringer med solceller for Karinelund studentby heter PV\*SOL. Denne programvaren er valgt på grunn av brukervennlige funksjoner som gjør det enkelt å simulere et tredimensjonalt system. Programmet kan også laste inn data fra eksterne filer. Programvaren PVsyst ble også testet ut, men denne programvaren var ikke like brukervennlig for takmonterte paneler. I følge utvikleren av programvaren *Valentin Software* tilbyr PV\*SOL den mest detaljerte konfigurasjonen og skyggeanalysen for solcelleanlegg [201]. Både PV\*SOL og PVsyst bruker de samme meteorologiske dataene og innholdet i databasene for paneler, vekselrettere og batterier er stort sett likt. Videre i kapittelet forklares programvaren

PV\*SOL og hvilke valg og antagelser som er tatt for å generere potensialet for strømproduksjon fra takmonterte solceller for Karinelund.

### 3.3.1 Klimadata og systemtype

Det første steget i simuleringen er å definere systemets lokasjon og hva slags type system som skal genereres. Klimadataene er stilt inn for koordinatet 63° 24' 41" N og 10° 26' 26" Ø som er midt på tomten til Karinelund studentby. PV\*SOL henter sine klimadata fra kilden *Meteonorm 8.1(i)*. I denne simuleringen er det brukt data fra 1996-2015 for Trondheim. Programvaren oppgir en gjennomsnittlig årstemperatur på 6,3°C og en årlig solinnstråling på 895 kWh/m<sup>2</sup> for denne lokasjonen.

Systemtypen som benyttes heter "3D, nettilkoblet solcelleanlegg med elektriske apparater og batterisystem". Ved å bruke et system med elektriske apparater kan energiforbruket legges inn i systemet. Siden forbruket fra Sit er oppgitt for hver time i året, kjøres simuleringen med en tidsoppløsning på 1 time. PV\*SOL anbefaler derimot å benytte tidsoppløsning i minutter når batteriene og inverterne i systemet er av en viss størrelse. Standard for programvaren er å bruke *Hofmann-metoden* for beregning av diffus innstråling, og *Hay & Davies* som modell for bestråling på skråplan. Programvaren finner automatisk informasjon om kraftnettet i det landet som velges for simuleringen. I dette systemet oppgis det at spenningen er på 230 V, nettet har tre faser og at effektfaktoren,  $\cos \phi$ , er lik 1.

PV\*SOL kan regne ut hvor mye CO<sub>2</sub> som spares ved å benytte energi fra solceller i stedet for den nasjonale kraftmiksen, ved å legge inn verdien for den spesifikke CO<sub>2</sub>-besparelsen i g/kWh. NVE definerer hvert år en klimadeklarasjon for fysisk levert strøm for det foregående året, og for 2021 var den beregnede CO<sub>2</sub>-faktoren for strømforbruk 11 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Strøm fra fornybare produksjonsteknologier slik som sol, har en CO<sub>2</sub>-faktor på 0 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Årsaken til at CO<sub>2</sub>-faktoren er lav for Norge er at energien fra kraftnettet i all hovedsak er produsert fra fornybare kilder [202].

Forbruket til Karinelund er lagt inn i programmet ved å importere en csv-fil med forbruket for hver av boligene for alle 8760 timene i året. Programvaren vil deretter fordele forbruket til årets måneder siden det er angitt at forbruket gjelder fra 1. januar 2022 til 31. desember 2022. Simuleringen i PV\*SOL følger en bestemt rekkefølge. For hver time i året sammenligner programvaren produksjonen fra solcellene og forbruket til studentbyen. Først benyttes produksjonen fra solcellene til å dekke forbruket. Hvis forbruket er mindre enn produksjonen, lagres overskuddsproduksjonen i batteriene. Når batteriene er fulladet, selges overskuddsstrømmen tilbake til kraftnettet. I de timene der produksjonen ikke er høy nok til å dekke forbruket, og det heller ikke er tilgjengelig energi på batteriene, importeres kraft fra nettet.

### 3.3.2 3D-modellering

For å plassere solcellepaneler på de ulike takene er hele studentbyen modellert i 3D som vist i Figur 3.8. PV\*SOL har en funksjon som tillater å importere bilder fra Google Maps. Kartet gjør det enklere å plassere bygningene i studentbyen i forhold til hverandre og finne orienteringen (azimuthvinkelen) til bygget. Byggene designes ved å velge taktype, i dette tilfellet saltak, og legge inn målene for høyde, bredde, lengde, takvinkel og takutstikk som vist i Tabell 3.1. Sykkelbodene er ikke inkludert i 3D-modelleringen. Bodene har små takareal, samtidig som eventuelle solcellepaneler vil få mye skygge siden høyden på bodene er lavere enn boligene. Etter at boligene er plassert i forhold til hverandre kan det legges til skyggeobjekter som trær, piper og andre bygg. Boligene har fire takhatter for luftinntak og avkast. I simuleringen er disse modellert som piper. Pipene er plassert 1,2 meter fra takmønnet og 1,24 og 13,725 meter fra hver av takets kortsider.

Nærliggende objekter kan skyggelegge panelene, og dette vil påvirke produksjonsresultatet til hele taket. Bolig 151, 153 og 151, har flere bjørketrær på sørsiden av byggene som vil kaste skygge på den sørvendte takflaten. I tillegg vil et annet tre skygge for panelene ved bolig 149. I 3D-modelleringen er det kun mulig å velge mellom kategoriene bartre og løvtre ved innsetting av skyggeobjekter i form av trær. Høyden på trærne er hentet fra Google Earth. Alle trærne i simuleringen har 0,5 m diameter på trestammen og 6 m diameter på bladkrona. Det er også lagt inn i programvaren at bladkrona alltid starter 3 meter over bakkenivå. For lysgjennomslippet til bladtreet er det brukt standardverdien som ligger inne i PV\*SOL for hver av årets måneder. Programvaren oppgir et lysgjennomslipp på maksimalt 50 % i noen av vintermånedene, mens det kun er 10 % gjennomslipp i juni og juli.

For hver av takflatene i 3D-modellen kan det defineres en bestemt avstand fra kanten av taket hvor det ikke er mulig å plassere solceller. Programvaren legger automatisk inn en kantavstand rundt pipene. Standarden fra Norsk Elektronisk Komité, *NEK-400*, omhandler prosjektering og utførelse av elektrisk lavspenningsinstallasjoner og anbefaler en viss kantavstand for utforming av solcelleanlegg. Kantavstanden skal gjøre det mulig for brannvesenet å komme til på taket. Det anbefales en fri korridor langs mønet og på minst en av takets ytterkanter dersom det er solceller på alle takflater. Det er ingen krav til avstand fra ytterkanten og mønet dersom ikke alle byggets takflater benyttes til solproduksjon [203].

Det er kun bolig 159A som har solcellepaneler installert på begge takflatene, og bygget er derfor modellert med kantavstand i henhold til kravene i *NEK 400*. Begge takflatene på bygg 159A har en korridor langs mønet med en bredde på 0,6 m, og det er en korridor på 1 m på sørenden av den østvendte takflaten. Korridoren er plassert på denne ytterkanten siden det allerede er piper på den østvendte takflaten, i tillegg til at det er en tilkomstvei for utrykningskjøretøy ved byggets sørside.





Figur 3.8: System benyttet i scenario 2. Hentet fra PV\*SOL.

### 3.3.3 Solcellepaneler

Solcellepanelet som benyttes i simuleringen er fra leverandøren Longi Solar og modellen heter *LR5-54HPB 400 M*. Dette monokrystallinske panelet kan kjøpes av norske kunder via Solcellespesialisten og panelets egenskaper er gitt i Tabell 3.5. Solcellespesialisten oppgir på sine nettsider at panelet har flere fordeler: Redusert effekt av skygge ved energiproduksjon, lavere sjanse for overoppheting av enkelte celler, og høyere effekt enn andre paneler [204].

Tabell 3.5: Egenskaper Longi solar LR5-54HPB 400 M. (Hentet fra [205, 204])

Egenskap	Verdi	Enhet
Antall celler	108 (6×18)	[-]
Vekt	21,5	[kg]
Dimensjon	1722×1134×30	[mm]
Operasjonstemperatur	-40 til 85	[°C]
Makismal effekt	400	[W]
Virkningsgrad	20,5	[%]
Pris	2 588,-	[kr/stk]
	90 627,-	[kr/36 stk]

For å utnytte arealet på taket optimalt er det valgt en vertikal retning på panelene. Panelene er montert på taket ved å bruke alternativet *mounted-roof* i programvaren. Ved *mounted-roof* er panelene montert på en struktur som ligger over takbelegget. Avstanden mellom hvert panel er satt til 3 cm i både horisontal og vertikal retning. Mellom hvert panel på raden monteres det en midtklemme, og det er størrelsen på denne som angir avstanden mellom panelene. Den britiske forhandleren Chiltern Solar sier at midtklemmer brukes for å sikre at panelene holdes på plass og at avstanden blir minst 2 cm [206]. Siden Solcellespesialisten selger midtklemmer på 3-5 cm brukes en avstand på 3 cm i simuleringen [207]. For å fylle takflaten med maksimalt antall paneler benyttes funksjonen *cover*, som distribuerer solceller på takets tilgjengelige areal.

PV\*SOL oppgir den installerte effekten på hver av takflatene og det er bolig 149, 151, 153, 155 og 159A vest som har den høyeste effekten med 20 kWp. Bolig 157, 159B og 159A øst har piper på takflaten hvor det er montert solceller, slik at det blir færre paneler på taket og en lavere installert effekt. Den installerte effekten til bolig 157 og 159B er 16,8 kWp. Den østvendte takflaten til 159A har i tillegg til piper også kantavstand som gjør at det kun er installert 16,4 kWp.

### 3.3.4 Vekselrettere og kabling

Solcellene fra den vest- og østvendte takflaten for bolig 159A er koblet til samme vekselretter, slik at det kun er en omformer i hvert bygg. Valget av invertere er også tatt på bakgrunn av hvilke som er tilgjengelig for privatkunder i Norge via Solcellespesialisten. Solcellespesialisten leverer invertere til 230 V og trefasestrøm fra leverandørene GROWATT og INVT. Ved å begrense PV\*SOL til å bare kunne velge mellom modellene som selges via Solcellespesialisten foreslo PV\*SOL den mest egnede modellen til hvert av byggene.

I følge PV\*SOL er GROWATT New Energy Co. leverandøren som er mest egnet for dette systemet. Simuleringen inneholder derfor fire stykker GROWATT MID 17KTL3-XL vekselrettere montert på bygg 149, 151, 153 og 155. Inverterene har en dimensjonerende faktor på 117,6 %. I PV\*SOL er dimensjonerende faktor definert som forholdet mellom installert DC effekt fra solcellepanelene, og AC effekten til vekselretteren. For et solcelleanlegg med en gitt installert effekt vil den dimensjonerende faktoren øke når inverteren har mindre effekt. Bolig 159A har installert en MAX 30KTL3-XL vekselretter, mens det benyttes to stykker MID 15KTL3-XL for bygg 157 og 159B. Den dimensjonerende faktoren for bolig 159A har nabolagets høyeste verdi på 121,3 %, mens 157 og 159B har en faktor på 112 %. Kablene er koblet sammen ved hjelp av funksjonen *automatic cabling*. Tapene i kablene beregnes automatisk i den tredimensjonale visualiseringen og er estimert til 0,58 %.

### 3.3.5 Batteridimensjonering

Av batterileverandører i databasen i PV\*SOL er det kun den tyske leverandøren BMZ som selger batterier på det norske markedet. BMZ-batterier selges blant annet via strømkilden.no som har solgt batterilagringssystemer til norske hytter siden 2014 [208]. De minste BMZ-modellene som er tilgjengelig på det norske markedet har NMC-katode, mens den største modellen har NCA-katode [209]. Av alle de andre batteriene i PV\*SOL sin database var det ingen andre batterier som var mulig å få tak i via norske forhandlere. Batteriprodusenten Voltfang fra Tyskland, var derimot nevnt på den norske siden til European Recycling Platform i forbindelse med å ha vunnet en miljøpris for å lage energilagringssystemer av resirkulerte elbilbatterier. I tillegg til BMZ og Voltfang, lå LFP-batterier fra den danske leverandøren XOLTA inne i PV\*SOL sin database. Studiet fra Aalborg som er nevnt i Kapittel 2.5.4 benytter XOLTA-batterier med kapasitet på 79 kWh, og dette gir sammenligningsgrunnlag for resultatene fra simuleringen [138]. De tre nevnte leverandørene produserer Li-ionbatterier og denne batteritypen er ansett som en av de beste løsningene for energilagring i Norge, samtidig som at prisen for teknologien er fallende.

Tabell 3.6: Test av ulikt antall XOLTA-batterier

Antall batteripakker	Batteri-kapasitet [kWh]	Forbruk dekket av kraftnettet [kWh]	Forbruk dekket av FV og batteri [kWh]	$\varphi_{SS}$ [%]	$\varphi_{SC}$ [%]
0 stk	0	365408	91619	20,0	67,6
2 stk	149,2	346577	110450	24,2	81,5
3stk	223,8	339972	117055	25,6	86,4
4 stk	298,4	337145	119882	26,2	88,5
5 stk	373	336815	120212	26,3	88,7
6 stk	447,6	336302	120725	26,4	89,1
7 stk	522,2	336035	120992	26,5	89,3
8stk	596,8	334860	122167	26,7	90,2
10 stk	746	334989	122038	26,7	90,1
12stk	895,2	336703	120324	26,3	88,8

Tabell 3.7: Tap med ulikt antall XOLTA-batterier

Antall batteripakker	Tap fra lading/utlading [kWh]	Tap i batteriet [kWh]	Totalt tap [kWh]	Total batterilading [kWh]	Tapsprosent [%]
2 stk	1230	161	1391	21073	6,6
3stk	1951	121	2072	27284	7,6
4 stk	2674	94	2768	30732	9,0
5 stk	3385	59	3444	32663	10,5
6 stk	4120	38	4158	33816	12,3
7 stk	4879	33	4912	34763	14,1
8stk	5692	31	5723	35674	16,0
10 stk	7657	48	7705	37378	20,6
12stk	10134	82	10216	39026	26,2

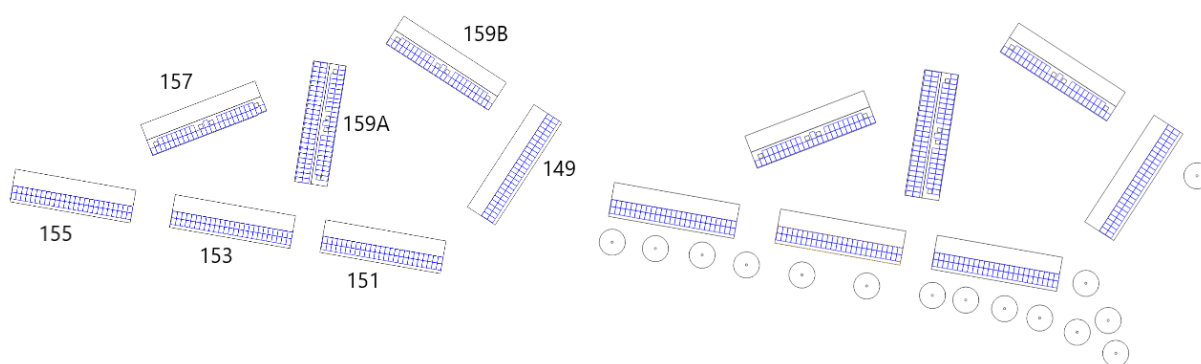
For å velge en hensiktsmessig størrelse på energilageret i studentbyen er det kjørt simuleringer med ulikt antall batterier som vist i Tabell 3.6. Med bakgrunn i studien fra ECEEE ble det valgt å starte simuleringen med en batteristørrelse tilsvarende FV-systemets installerte wattpeak. Med en installert effekt på 150 kWp er BMZ-batteriet med kapasitet på 6,4 kWh for lite, i og med at PV\*SOL setter en begrensning på 20 batterier. Voltfangbatteriet med kapasitet på 65,9 kWh ville gitt et forhold på 1,3 for 3 batterier og 0,8 for to batterier. XOLTA-batteriet med en kapasitet på 74,6 kWh gir 149,2 kWh for to batterier, og var dermed batteriet som var mulig å dimensjonere nærmest et 1:1 forhold for kWh og kWp.

Som vist i Tabell 3.6 er selvforsyningsgraden og egenkonsumet størst med åtte batteripakker. Økningen per installerte batteripakke er størst opp til fire batteripakker, etter dette er det en liten økning på mindre enn 1 %. For alle antallene batterier er forholdet mellom  $\varphi_{SS}$  og  $\varphi_{SC}$  på 29,3 %. Dette er det samme som forholdet mellom last (L) og produksjon (P), og kalles solfraksjon. Selv om  $\varphi_{SS}$  og  $\varphi_{SC}$  endres, vil forholdet mellom P og L forbli det samme. Tabell 3.7 viser hvor mye tap det er i forbindelse med antall batteripakker. Tapsprosenten øker med flere batteripakker. Tapet internt i batteriet er minst for åtte batteripakker, men tapet i forbindelse med lading og utlading blir høyere for hver ekstra batteripakke. For videre simulering er det

valgt å bruke fire batteripakker.

### 3.4 Simulering av Karinelund studentby med ulike scenarier

Simuleringen er kjørt med fire ulike scenarier. I scenario 1 (SC1) og scenario 2 (SC2) benyttes forbruket oppgitt av Sit og et energilagringssystem med fire batterier. I SC2 er det i tillegg lagt inn 15 trær som vist til høyre i Figur 3.8 og i Figur 3.9. I scenario 3a (SC3a) og scenario 3b (SC3b) benyttes forbruket etter installasjon av varmepumper. SC3a har et energilagringssystem med fire batterier, mens SC3b har et energilagringssystem med to batterier. Utformingen av systemet i SC1, SC3a og SC3b er vist til venstre i Figur 3.9. Solcelleanleggene er like i hvert scenario med en installert effekt på 150 kWp, sju invertere og 375 paneler som gir et totalt areal med solceller på 732,3 m<sup>2</sup>.



Figur 3.9: Utforming av system uten (t.v) og med (t.h) skygge fra trær. Hentet fra PV\*SOL.

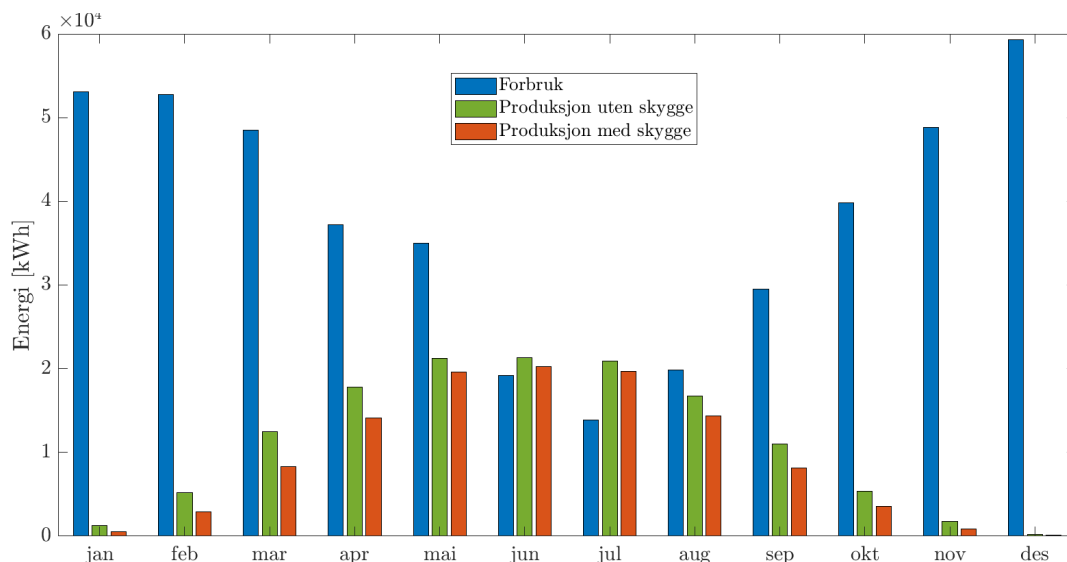
### 3.5 Resultater fra simulering PV\*SOL

I denne seksjonen fremstilles resultatene for de ulike scenarioene. Resultatene fokuserer på differansene mellom produksjon og forbruk, effekten av skygge fra trærne på tomten, og forskjellen i kraftproduksjonen fra de ulike takene. Til slutt vises ulikhetene mellom scenarioene.

#### 3.5.1 Scenario 1

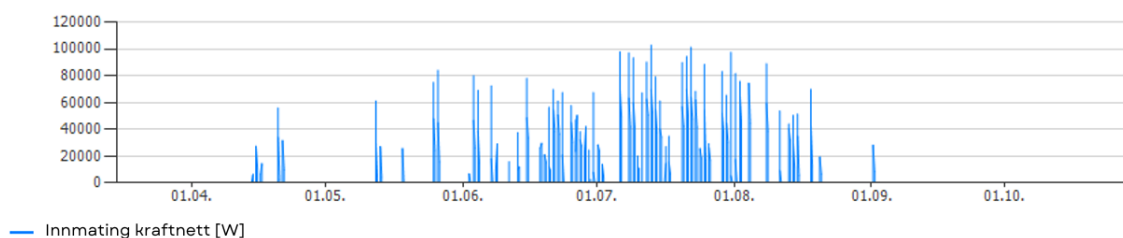
For SC1 var det totale forbruket 456 945 kWh/år og total produksjon fra hele systemet 135 467 kWh/år. Dette gir et produksjonsunderskudd på 321 478 kWh/år. Topplasten, som angir det maksimale effektforbruket i løpet av året, er på 142,9 kW. Det årlige utbyttet, som er forholdet mellom energiproduksjon og installert effekt på solcellene, har en verdi på 902,57 kWh/kWp. Selv om det ikke er trær i dette systemet oppgir programvaren at studentbyen har en reduksjon i årlig utbytte på grunn av skygge på 2,4 %. Systemets ytelsesforhold er 90,58 %. Ved å benytte egenprodusert strøm fra solceller har Karinelund spart 1459 kg CO<sub>2</sub>-utslipp i løpet av året. Systemets selvforsyningsgrad og solfraksjon er på henholdsvis 26,2 % og 29,6 %.

Figur 3.10 viser forskjellen mellom systemets totale energiforbruk (blå) og produksjon (grønn) for hver måned. Det er kun i månedene juni og juli at forbruket er lavere enn den produserte mengden energi.



Figur 3.10: Forskjell i produksjon og forbruk per måned for SC1 og SC2.

Den innmatede effekten på kraftnettet fra april til oktober er vist i Figur 3.11. Det er kun i disse månedene at systemet sender kraft tilbake på strømmettet. I juli er det to dager hvor produksjonsoverskuddet for en time er mer enn 100 kW, med henholdsvis 3 kW og 2 kW.

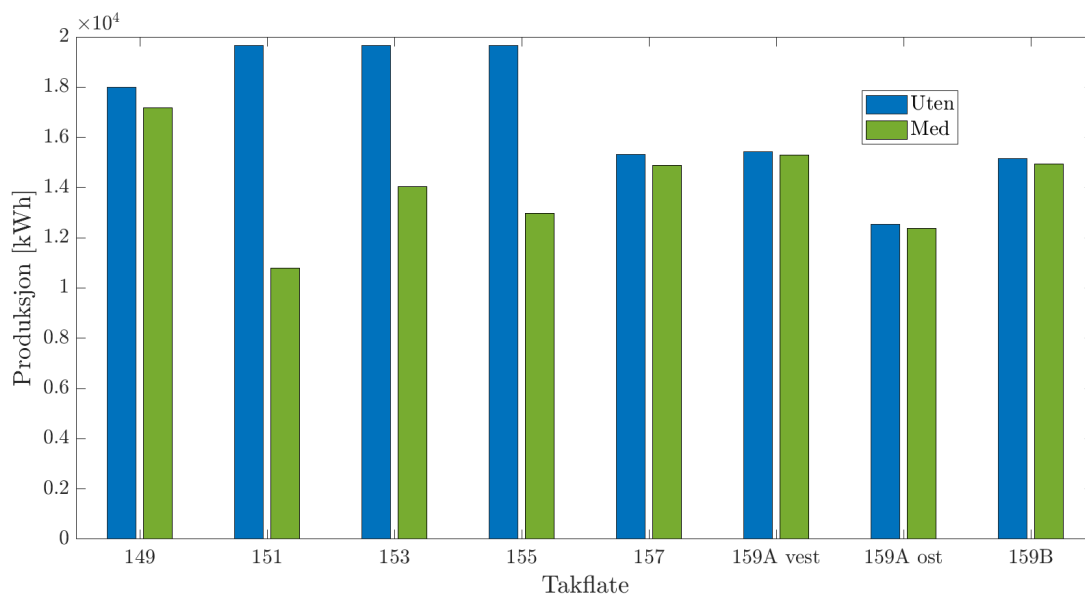


Figur 3.11: Innmating for SC1. Hentet fra PV\*SOL.

### 3.5.2 Scenario 2

Både forbruket og makslasten i SC2 er likt som i SC1. Siden dette scenarioet har mer skygge, er energiproduksjonen på 112 466 kWh/år. Dette er omtrent 23 000 kWh/år lavere enn i SC1. Reduksjonen i energiproduksjonen er på 17 %. SC2 har et årlig utbytte på 749,22 kWh/kWp, dette er 16,5 % mindre enn i SC1. Ytelsesforholdet i SC2 er oppgitt til å være 76,21 %. Studentbyen sparer 1224 kg CO<sub>2</sub>-utslipp per år, og i dette scenarioet er systemets selvforsyningsgrad og solfraksjon på henholdsvis 22,0 % og 24,6 %. På samme måte som i SC1 er produksjonen høyere enn forbruket i månedene juni og juli som vist med den røde søylen i Figur 3.10. Denne figuren viser også forskjellen mellom produksjon med skygge (rød) og uten skygge (grønn).

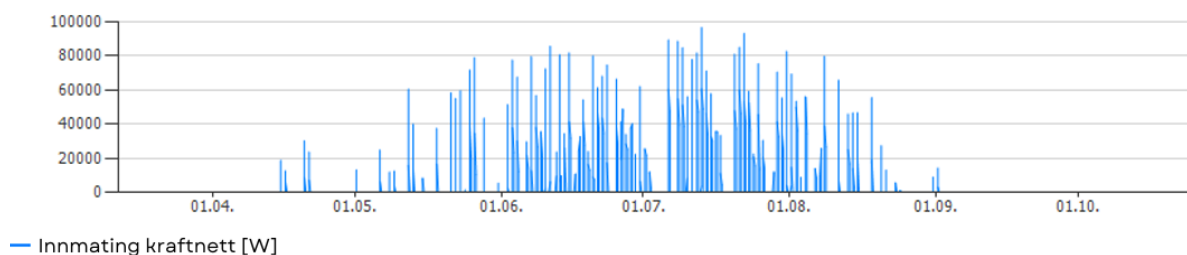
Figur 3.12 viser den årlige produksjonen for de ulike takflatene. Den blå stolpen viser produksjonen fra simuleringene uten trær, mens den grønne stolpen viser effekten av å legge til trær i 3D-modellen. Som vist i figuren har de sørvendte takflatene i bygg 151, 153 og 155 den



Figur 3.12: Differanse i energiproduksjon per takflate med og uten skygge.

høyeste produksjonen, etterfulgt av bolig 149. Den laveste produksjonen tilhører den østvendte takflaten til 159A, med en årsproduksjon på omtrent 12 500 kWh. De resterende tre takflatene har en årsproduksjon på mellom 15 160 og 15 420 kWh.

Skyggeleggingen fra trærne gjør at alle takflatene får en lavere kraftproduksjon, og det er solcellepanelene på taket til bolig 151 som påvirkes i størst grad. Disse panelene har en produksjonsreduksjon på omtrent 8880 kWh/år. Figuren viser at panelene på bolig 155 og 153 også får et betydelig produksjonstap på henholdsvis 6700 og 5680 kWh/år. Takflatene 159A vest, 159A øst og 159B blir minst påvirket av skygge, og de respektive tapene er på 120, 169 og 220 kWh/år. Med skygge vil panelene på bygg 151 produsere mindre kraft enn det takflaten til 159A øst gjør, både med og uten skygge.



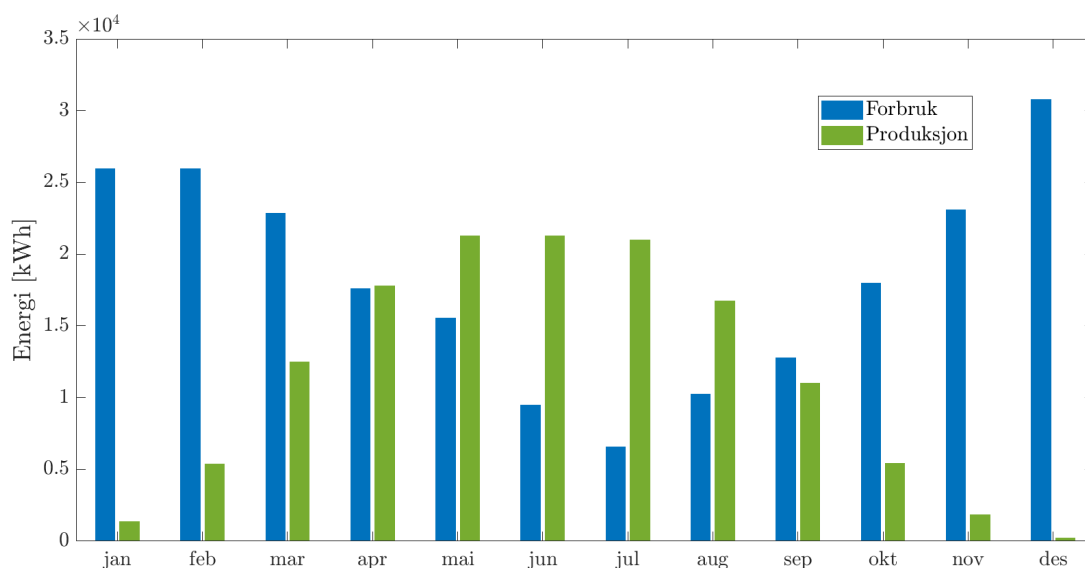
Figur 3.13: Innmating til kraftnettet for SC2. Hentet fra PV\*SOL.

Figur 3.13 viser hvor mye strøm som mates inn på kraftnettet som følge av overskuddsproduksjon i SC2. I dette scenarioet er den maksimale innmatede effekten lest av til 96 kW, og er dermed innenfor kravet i plusskundeordningen. Systemet mater inn mest effekt i juni og juli, men også i april, mai, august og september.

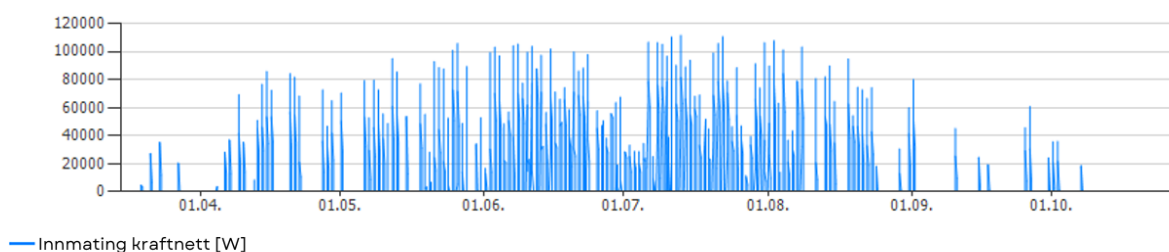
### 3.5.3 Scenario 3

Denne simuleringen henter inn forbruket som oppnås med bruk av varmepumper, og dette er på 218 807 kWh/år. Energiproduksjonen er på 135 467 kWh/år. Siden energiproduksjonen er lik som i SC1, er både årlig utbytte, reduksjonen i utbytte på grunn av skygge og ytelsesforholdet de samme verdiene som oppgitt for SC1. Solfraksjonen er på 61,9 % for både SC3a og SC3b. SC3a med fire batteripakker har lavest reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp med 1448 kg/år. Dette scenarioet har også høyere selvforsyningsgrad på 40,6 %. I SC3b med to batterier endres begge disse verdiene til henholdsvis 1469 kg CO<sub>2</sub>/år og 36,9 %.

Figur 3.14 viser energiforbruket (blå) og energiproduksjonen (grønn) for SC3a og SC3b. I dette scenarioet produseres det mer strøm enn det forbrukes i april, mai, juni, juli og august. Figuren viser også at det produksjonen er omtrent like stor fra mai til juli.



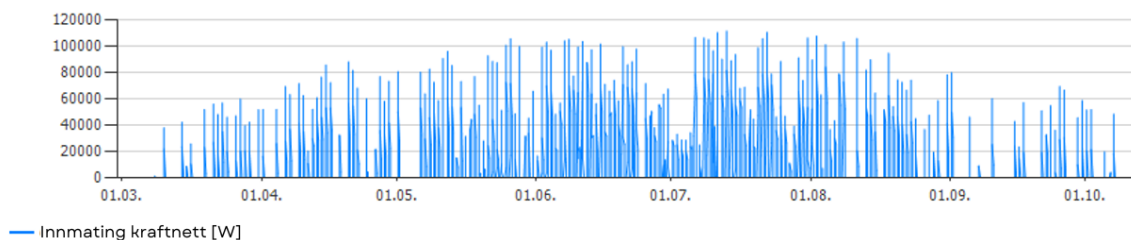
Figur 3.14: Forbruk og produksjon for SC3a og SC3b.



Figur 3.15: Innmating til kraftnettet for SC3a. Hentet fra PV\*SOL.

Som vist i Figur 3.15 er det 16 dager i SC3a hvor den innmatede effekten er på over 100 kW. På disse dagene varierer den innmatede effekten fra 101-112 kW og i opptil 4 timer hver dag. I SC3b er det 17 dager i løpet av året hvor det mates inn effekt mer enn det en plusskunde har lov til, som vist i Figur 3.16. Grensen på 100 kW overskrides mellom 1 og 4 timer per dag i disse

17 dagene.



Figur 3.16: Innmating til kraftnettet for SC3b. Hentet fra PV\*SOL.

### 3.5.4 Ulikheter mellom scenarioene

Tabell 3.8 viser hovedtrekkene for de ulike scenarioene. Verdiene er hentet fra energiflytdiagrammet for hver av simuleringene i PV\*SOL slik som vist i Figur 3.17 for SC3a. Forbruket oppgitt i tabellen er summen av forbruksdataene lagt inn i simuleringen, og de 82 kWh som vekselretteren bruker i løpet av et år på beredskap (standby consumption).

Tabell 3.8: Sammenligning av ulike scenarioer

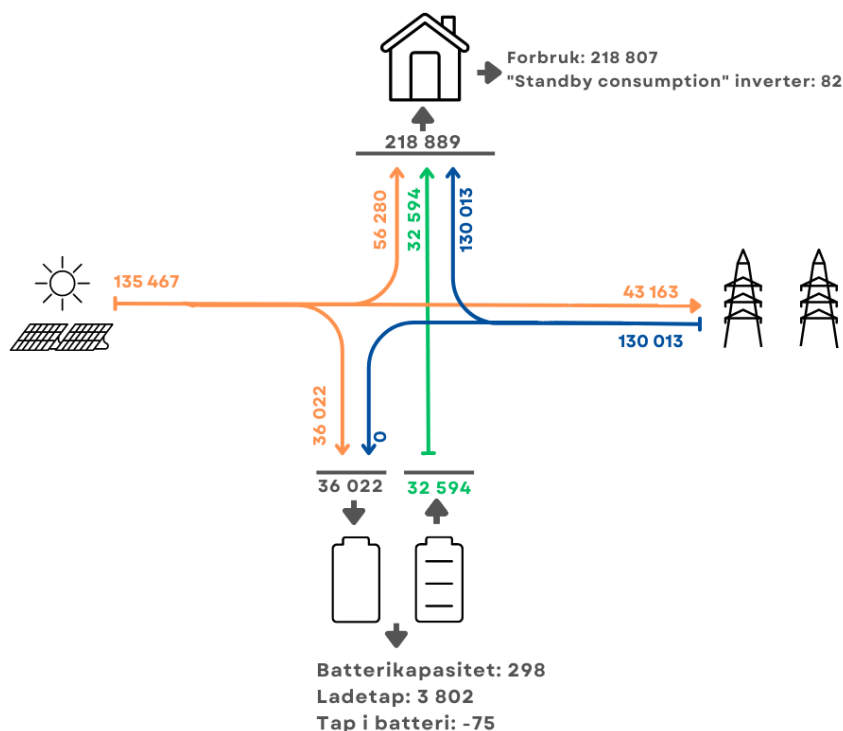
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3a	Scenario 3b
Forbruk	457 027	457 027	218 889	218 889
Produksjon	135 467	112 466	135 467	135 467
Produksjon til forbruk	91 618	78 961	56 280	56 280
Produksjon til batteri	30 732	23 743	36 022	26 187
Batteri til forbruk	28 263	21 765	32 594	24 517
Kraftnett til forbruk	337 145	356 300	130 013	138 090
Kraftnett til batteri	0	0	0	0
Produksjon til kraftnett	13 116	9 761	43 168	52 999
Tap fra opp-/utladning	2674	2213	3802	1743
Batteritap	94	63	-75	76

Produksjonen er lik for alle scenarioene unntatt SC2. SC1 benytter over 12 000 kWh mer av produksjonen til å dekke forbruket enn SC2. Både SC3a og SC3b bruker 56 280 kWh fra solproduksjonen til å dekke forbruket, som er den laveste mengden av samtlige scenarioer. SC3a henter mest solkraft til batteriet, etterfulgt av SC1. SC3b bruker omtrent 10 000 kWh mindre energi fra produksjonen til batteriet enn SC3a. SC2 har den laveste verdien med 23 743 kWh. Andelen forbruk som dekkes av batteriet følger i samme rekkefølge.

Det brukes mest energi direkte fra kraftnettet for å dekke forbruket i SC2. Deretter følger SC1 med omtrent 19 000 færre kilowattimer energi hentet fra nettet. SC3a og SC3b har halvparten så stort forbruk som SC1 og SC2, og benytter mindre en halvparten så mye kraft fra kraftnettet sammenlignet med de to andre scenarioene. Det er ingen av scenarioene som benytter energi fra kraftnettet til å lade opp batteriet. SC3a og SC3b sender mest av kraftproduksjonen tilbake på kraftnettet. SC3b, som har to batterier, sender 9831 kWh mer til nettet enn SC3a, som har fire batterier. SC3b sender omtrent 39 % av produksjonen tilbake til nettet, og for SC3a, SC2 og



SC1 er disse andelene henholdsvis 32 %, 8,7 % og 9,7 %.



Figur 3.17: Energifyttdiagram for SC3a. Basert på figur fra PV\*SOL.

Scenarioene hvor det benyttes fire batterier har høyest tap som følge av opp- og utladning i batteriene. SC3a har mer enn dobbelt så høyt ladetap som SC3b. Det høyeste batteritapet oppstår i SC1 med 94 kWh, fulgt av SC3b på 76 kWh og SC2 med 63 kWh. Derimot har simuleringen beregnet et negativt batteritap i SC3a.

Tabell 3.9: Energimatching

	SC1	SC2	SC3a	SC3b
$\varphi_{SS}$	26,2	22,0	40,6	36,9
$\varphi_{SC}$	88,4	89,6	65,6	59,6
$\varphi_{SS}/\varphi_{SC}$	29,7	24,6	61,9	61,9

Tabell 3.9 viser FV-systemets selvforsyningsgrad, graden av egenkonsum og forholdet mellom disse for de ulike scenarioene. Solfraksjonen er høyest og lik i SC3a og SC3b. Likevel er både selvforsyningsgraden og egenkonsumet størst i SC3a. Det største egenkonsumet er i SC2, men dette har også den laveste solfraksjonen.

### 3.6 Økonomiske kostnader

Tabell 3.10 viser hva utgiftene for solcelleanlegget kan bli dersom man kjøper panelene [204] og inverterene [210] gjennom Solcellespesialisten. XOLTA oppgir ikke prisen på BAT-80 batteriet på sine nettsider, men det selges XOLTA-batterier med en kapasitet på 10 kWh til 74 250 DKK [211]. Dersom det er samme pris per kilowatttime kapasitet vil et BAT-80 batteri koste 594 000 DKK, som tilsvarer nesten 940 000 NOK. Prisene i tabellen inkluderer ikke kostnaden for ledninger og kabler eller monteringen av systemet.

Tabell 3.10: Pris for solcelleanlegget

Produkt	Antall	Pris per stk [NOK]	Totalpris [NOK]
Solcellpaneler	375	2 588,- 90 627,- (36 stk)	945 090,-
Inverter MID 17KTL3-XL	4	31 508,-	126 032,-
Inverter MID 15KTL3-XL	2	28 849,-	57 698,-
Inverter MAX 30KTL3-XL	1	44 134,-	44 134,-
Batteri	4	940 000,-	3 760 000,-
Totalsum			4 888 820,-

Enova oppgir at kostnaden for et solcelleanlegg ligger på 100 000-300 000 NOK, inkludert installasjon. Prisen vil avhenge av solforhold, strømpris, lokasjon, takvinkel og anleggets størrelse og effekt. Enova oppgir at et solcelleanlegg er mest lønnsomt når kunden kan bruke mest mulig av den egenproduserte strømmen selv [94]. Kostnaden for kun solcellepanelene og vekselrettere for anlegget er på 1 128 820 NOK. Dette gir en pris på 161 260 NOK per bygg. Prisen for hele anlegget inkludert batterier per bygg er lik 698 403 NOK.

Dersom det hadde vært privatpersoner som hadde eid boligene i Karinelund, kunne det vært søkt om å få støtte fra Enova til solcelleinstallasjonene. Enova gir 7500 kr i støtte for installasjon av anlegget og 2000 kr/kWp installert effekt i systemet opptil 20 kW. Det er kun bolig 159A som har høyere installert effekt enn dette, med tilsammen 36,4 kWp på øst- og vestflaten. Denne boligen kan dermed få 47 500 kr i støtte. Bolig 149, 151, 153 og 155 har installert 20 kWp som gir økonomisk støtte fra Enova på 47 500 kr. Siden bolig 157 og 159B har piper på takflaten med solceller har de kun installert 16,8 kWp med solceller. Disse to boligene vil få den laveste støtten på 41 100 kr. Tilsammen vil boligene i Karinelund få 319 700 kr i støtte av Enova. Med denne støtten er den totale prisen på solcellene og inverterene lik 809 120 kr.

Toshiba oppgir på sine nettsider en veilevende pris på Multisplitt Polar på 40 990 NOK pluss installasjon fra 9000 NOK [212]. Hvert bygg har to utedeler, for hele studentbyen monteres det 14 varmpumper. For varmpumpene blir utgiften på 573 860 NOK, mens monteringen koster 126 000 NOK. Den totale kostnaden blir dermed på omtrent 699 860 NOK. Enova gir ingen økonomisk støtte til privatpersoner for installasjon av luft-til-luft varmpumpe.

## 4 Diskusjon

Med bakgrunn i temaet positive energiblokker, ble det valgt å undersøke konseptet energipositive nabolag. Et energipositivt nabolag vil avlaste belastningen på kraftnettet ved at det kan benytte egenprodusert kraft i perioder med høy etterspørsel. Produksjonsoverskuddet kan enten lagres eller sendes tilbake til kraftnettet. Hensikten med bacheloroppgaven er å undersøke hvordan Karinelund studentby kan bli et energipositivt nabolag. Med bakgrunn i kunnskap fra litteraturstudiet presentert i Kapittel 2, har det blitt gjort beregninger på U-verdien til ulike bygningsdeler, energibesparelsen ved bruk av varmepumper, hvor mye strøm Karinelund studentby kan produsere ved å installere solceller og batteristørrelsen som egner seg best for lagring av denne energien. I mange tilfeller har det vært nødvendig å ta visse antagelser, og dette påvirker resultatene i varierende grad. Enhver simulering og beregning vil derfor ha potensielle feilkilder.

I denne seksjonen diskuteres resultatene fra casestudien og metodene som er brukt. Antagelsene som er gjort for beregningene i Kapittel 3 vil bli begrunnet ytterligere, og det vil diskuteres hvordan disse har påvirket resultatene. Strukturen følger samme rekkefølge som i metoddelen, før det diskuteres om Karinelund kan oppnå status som et energipositivt nabolag. Til slutt presenteres det forslag til videre arbeid med bakgrunn i funnene fra denne oppgaven.

### 4.1 Bygningskroppen

Boligene på Karinelund er 37 år gamle og egner seg derfor godt for oppgradering av bygningskroppen. Gamle hus krever mye vedlikehold og har økt risiko for brann- og vannskader. Hvis det uansett skal byttes rør eller elektrisk anlegg vil det også være hensiktsmessig å oppgradere varmeisolasjonen og skifte vinduer. Dette er ressurskrevende, men til gjengjeld vil det kunne gi store energibesparelser som følge av redusert varmetap. Siden Karinelund aldri har gjennomgått en energioppgradering og har panelovner som eneste oppvarmingskilde, havner boligene nederst på energimerkingskalaen med energikarakter G og oppvarmingskarakter rød. Ved å forbedre energimerkingskarakteren vil boligene øke i verdi.

#### 4.1.1 Yttervegger og vinduer

Som vist i Tabell 2.1 var det i TEK-85 stor forskjell på kravene til fasader i småhus sammenlignet med andre bygg. Ettersom Karinelund har høyst to etasjer, regnes boligene som småhus sammenbygd i rekke slik definisjonen fra 1985 tilsier. Den beregnede U-verdien av boligens yttervegger på  $0,35 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  er innenfor kravene i TEK-85 for boliger med 3-lags vinduer med U-verdi  $2,1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Likevel er U-verdien for ytterveggen for høy til å møte kravene i TEK-87, som ble innført bare ett år etter boligene ble oppført.

For å møte kravene til den gjeldende forskriften, TEK-17, kreves det tiltak for å oppgradere bygningskroppen. Etterisolering for å få lavere U-verdi og en tettere bygningskropp kan være en god investering. TEK-17 angir en energiramme på  $100 \text{ kWh/m}^2$  pluss et tillegg på  $1600 \text{ m}^2$  for småhus. For hele nabolaget tilsvarer dette et forbruk på  $204\,401 \text{ kWh}$  per år. Siden forbruket til

Karinelund etter installasjonen av varmpumper fortsatt er 14 407 kWh for høyt, holder det ikke å bare oppfylle minstekravet til U-verdi som oppgitt i Tabell 2.1. Byggets fasader og vinduer må derfor oppnå en U-verdi på henholdsvis 0,18 og 0,8 W/m<sup>2</sup>K. Med 8,6 cm ekstra isolasjon med ny mineralull vil ytterveggene møte kravet til nåværende TEK. Det er viktig å presisere at denne beregningen ikke har tatt høyde for påføring for det nye isolasjonslaget. Foringen vil være en kuldebro, og for å kompensere kan det være nødvendig med et enda tykkere isolasjonslag.

Ved å skifte ut vinduene kan nabolaget spare 266,7 kWh i året som vist i Kapittel 3.1.1. Beregningen er gjort med temperaturene for 2022, og er ikke nødvendigvis gjeldende i andre år. Ved å benytte et gjennomsnitt av historiske temperaturdata kunne resultatet blitt kvalitetssikret ytterligere mot årlige temperaturskjeller. Vindusberegningen tar ikke høyde for kuldebroer i skjøten mellom vinduskarmen og veggen. Selv om det er en forenklet beregning stemmer tallene godt med anslaget om at utskiftning av vinduer kan gi en energibesparelse på 40 %. Utskiftning av vinduer og etterisolering kan være lurt å gjøre i samme prosess, da man uansett må fjerne kledningen.

## 4.2 Energiforbruk

Beboermassen i Karinelund er relativt homogent siden alle som bor der er studenter. Dette innebærer at beboerne har lignende alder, økonomi og ferieavvikling. I tillegg er boligene oppført på samme tid med lik utforming og det bor i utgangspunktet like mange personer i hvert bygg. Som vist i Figur 3.5 er det likevel stor forskjell mellom strømforbruket i de ulike boligene. Denne forskjellen skyldes i stor grad atferden til leietakerene. Til tross for de individuelle forskjellene, følger boligenes forbruk de samme trendene gjennom året ved å ha høyest forbruk på vinteren og lavest i sommermånedene. En av årsakene til at forbruket er lavere på sommeren er at studentene har sommerferie. Samtidig er det vanlig at forbruket går ned på sommerhalvåret siden utetemperaturene øker og oppvarmingsbehovet minker som vist i Figur 2.9a.

### 4.2.1 Forbruket på Karinelund i forhold til landsgjennomsnittet

Leilighetene i Karinelund studentby har et årlig strømforbruk som er mer enn tre ganger så stort som landsgjennomsnittet for leiligheter av samme størrelse. Derimot er det viktig å påpeke at dette forholdstallet varierer mye avhengig av hvilken kilde som benyttes i sammenligningen. Av strømforbrukene oppgitt i Tabell 2.2 har leiligheten på 40 m<sup>2</sup> det laveste forbruket med god margin. Siden verdiene fra kildene varierer med omtrent 8500 kWh/år fra det laveste til det høyeste forbruket, er det regnet ut et gjennomsnittlig årsforbruk på 7451,2 kWh/år. Siden strømforbruket og arealet til en leilighet henger sammen, vil sammenligninger der det benyttes kilder som ikke oppgir størrelsen på leiligheten kunne gjøre at det trekkes feil konklusjoner. Sammenhengen mellom areal og forbruk er vist ved at leilighetene fra Forbrukerguiden har en forbruksøkning på 4200 kWh/år fra 40 m<sup>2</sup> til 110 m<sup>2</sup>. I tillegg er det viktig å påpeke at flere av kildene bruker data fra SSB for året 2012, og det er høy sannsynlighet for at forbruket har endret seg de siste 10 årene. Siden leilighetene i Karinelund er på 36,5 m<sup>2</sup> kan forbruket sammenlignes med leiligheter på 40 m<sup>2</sup>, og disse leilighetene har et årsforbruk på 2400 kWh. For

hver bolig (8 leiligheter) burde forbruket bli 19 200 kWh, og for hele studentbyen (56 leiligheter) burde det bli 134 400. Forbruket for 2022 var på 456 945 og er omtrent 3,4 ganger så stort som forbruket for leiligheter på 40 m<sup>2</sup>. Dersom årsforbruket til Karinelund for 2022 sammenlignes med gjennomsnittsverdien fra Tabell 2.2 vil forholdstallet bli 1,09.

Kilden som oppgir et årsforbruk mest likt det Karinelund hadde i 2022 er forbruket fra Tibber. Årsforbruket til Karinelund er 11 047 kWh lavere per år enn gjennomsnittsforkbruket fra Tibber sine kunder. Verdien fra Tibber er basert på data fra 2021 og 2022, og kan gi et godt sammenligningsgrunnlag siden forbrukene gjelder for samme år. Likevel er det viktig å påpeke at Tibber ikke oppgir størrelse på leilighetene og forbruket kan være basert på større leiligheter enn de på Karinelund. Studentbyen har også et lavere årsforbruk enn det som oppgis av Trøndelag Kraft, Fjordkraft og SSB.

#### 4.2.2 Beboeratferd

Det er tydelig at atferden til beboerne har en innvirkning på energiforbruket. Dette kommer også frem i resultatene fra spørreundersøkelsen vist i Figur 3.6 hvor omtrent 77 % svarte at de ville hatt en lavere innetemperatur i leiligheten dersom strømforbruket ikke var inkludert i leieprisen. Dersom disse beboerne hadde senket temperaturen ville deler av energiforbruket i byggene gått ned, siden energiforbruket går ned 5 % for hver grad innetemperaturen reduseres som forklart i Kapittel 2.3.5. Derimot svarte 18,2 % at de ikke ville satt ned innetemperaturen selv om de måtte betale for strømforbruket selv. Økonomi er derfor en faktor som påvirker atferden til leietakerne i ulik grad.

I spørreundersøkelsen svarte 63,3 % av studentene at de kjenner trekk fra vinduene. Det kan derfor tenkes at flere beboere hadde klaget på dårlig isolerte vegger og vinduer dersom Sit ikke hadde hatt strøm inkludert i leien. Dette ville kanskje presset studentskipnaden til å bytte vinduer eller etterisolere. Sannsynligvis ville de fleste studentene ha redusert forbruket dersom de måtte betale et tillegg for strøm, siden det har vært trenden for resten av norske husholdninger når strømprisene har økt. Det er viktig å presisere at spørreundersøkelsen baserer seg på et lite utvalg, bestående av 20 % av beboerne. Svarene kan derfor ikke sies å representere hele beboermassen, men undersøkelsen kan likevel gi en indikasjon på hvilke holdninger studentene har i forhold til eget energibruk.

#### 4.2.3 Passiv soloppvarming

Siden bygningene i studentbyen har ulik orientering, vil varmetilskuddet fra solinnstråling variere fra bolig til bolig. Bolig 159A har den høyeste totale produksjonen siden bygget er det eneste med solcellepaneler på begge takflatene. Dette vil også si at boligen får solinnstråling inn i vinduene på begge sidene av huset hele dagen, med unntak av når sola står høyest på himmelen. Det er også 159A som har det laveste forbruket og en teori er at den passive soloppvarmingen er en sentral årsak til dette.

#### 4.2.4 Energibesparende tiltak

Dersom det installeres et bedre ventilasjonssystem i leilighetene vil noe av forbruket kunne reduseres, da luftkvaliteten opprettholdes uten å måtte åpne vinduene. Lufting ved å åpne vinduet vil slippe ut mye oppvarmet luft, og det kreves mye energi for å varme opp den nye og kjøligere luften.

Ved å koble Karinelund til fjernvarmeledningen i nærheten kunne strømforbruket blitt redusert. Dette ville også gjort at studentbyen hadde bidratt til å få ned effekttoppene i kraftnettet, da oppvarmingsbehovet dekkes av en annen energikilde enn strøm. Varmtvannet vil ikke varmes opp av elektrisitet, men av energikilder som ellers ville gått til spille. På en annen side er det en dyr oppgradering av studentbyen da oppkobling til fjernvarme krever at bygningene har et vannbårent oppvarmingssystem.

### 4.3 Resultater fra varmpumpeberegningen

Installasjon av varmpumper gir en besparelse på over 50 % for samtlige boliger som vist i Kapittel 3.2.

Dette er en besparelse som er høyere enn det Toshiba selv oppgir som sannsynlig. I følge Toshiba kan en husholdning spare opptil 40 % som nevnt i Kapittel 2.3.5, men verdien avhenger av husets lokasjon, størrelse og isolasjon. Siden huset er dårlig isolert og flere leietakere oppgir at det trekker fra vinduet, er det sannsynlig at besparelsen for studentbyen i realiteten vil være lavere enn 40 %. Etter installasjon av varmpumper vil forbruket på Karinelund kun være 1,63 ganger større enn strømforbruket oppgitt for leilighetene på 40 m<sup>2</sup> fra Tabell 2.2.

Ved en reduksjon i forbruk vil menneskers atferd kunne endres slik at forbruket igjen økes, slik som i beskrevet i Kapittel 2.3.4. Det er høy sannsynlighet for at beboere ønsker et mer komfortabelt hjem dersom strømregningen har blitt billigere, og skrur opp innetemperaturen ytterligere. Hvis denne tilbakeslagseffekten forekommer vil besparelsen bli lavere enn beregnet.

#### 4.3.1 Konsekvensen av interpolasjon og ekstrapolasjon

Interpolasjon forutsetter at funksjonen som undersøkes har et jevnt forløp. Ved å bruke lineær interpolasjon er det antatt at funksjonen er en rett linje og at alle de ukjente verdiene ligger på denne rette linjen. I realiteten øker ikke COP-verdien med like mye for hver grad temperaturen øker som vist i Tabell 3.3. Ekstrapolering har ekstra høy usikkerhet siden det ikke er gitt at verdiene vil følge samme trend utenfor måledataen som for verdiene mellom målepunktene. For å finne COP-verdiene er det ekstrapolert for temperaturer over 12°C, og under -15°C. Det er mange timer i året hvor temperaturen overstiger 12°C, og alle disse ekstrapolerte COP-verdiene vil bidra til unaturlig høye COP-verdier ettersom effektfaktoren ikke vil fortsette å øke uendelig med økende temperatur. I løpet av året er det ikke mange timer som er kaldere enn -15°C, men ved så lave temperaturer vil COP-faktoren nærme seg 1. Det er sannsynlig at den virkelige kurven som viser forholdet mellom COP og temperatur vil stagnere over 12°C og under -15°C. De ekstrapolerte verdiene vil føre til at varmpumpene i realiteten fungerer dårligere enn det

som er beregnet.

### 4.3.2 Antall innedeler

Resultatet fra beregningene har en viss feilmargin siden det er benyttet et datablad med COP-verdier for varmepumpa med to innedeler, ikke fire. Siden den nominelle COP-en er høyere med to innedeler enn med fire, er det sannsynlig at COP-verdiene i beregningen er for høye. Derimot er den tilførte effekten (PI) og den totale kapasiteten (TC) som benyttes i utregningene gitt for fire innedeler. En varmepumpe med fire innedeler vil sannsynligvis ha et høyere varmetap på grunn av flere rør. Dette kan være årsaken til at den nominelle COP-verdien for fire innedeler er noe lavere enn for to innedeler.

Av estetiske årsaker er varmepumper med fire innedeler mer fordelaktig enn å ha en varmepumpe til hver av leilighetene, siden antall utedeler reduseres fra åtte til to stykker per bygg. I tillegg har hver leilighet et relativt lite areal, slik at et 1:1 forhold med ute- og innedeler hadde blitt overdimensjonerende. På en annen side vil utedelen fra en varmepumpe med flere innedeler antageligvis bråke mer enn en vanlig varmepumpe siden den har kraftigere motor for å dekke et høyere forbruk.

### 4.3.3 COP og installert effekt

I scriptet er årsvarmefaktoren beregnet til 5,56, mens i databladet for fire innedeler er det oppgitt at SCOP er 4,26. Denne feilkilden kan være på grunn av ekstrapoleringen som gir unaturlig høye COP-verdier. Årsvarmefaktoren vil påvirkes av dette da det er den gjennomsnittlige COP-verdien over et helt år.

Ved  $-17^{\circ}\text{C}$  har scriptet en COP-verdi på  $2,67^{\circ}\text{C}$ . Denne verdien virker legitim ettersom databladet oppgir en COP på 2,8 for  $-15^{\circ}\text{C}$ . På Toshiba's nettsider oppgis det at Multisplitt Polar er operativ ned til  $-25^{\circ}\text{C}$  og at den fortsatt kan varme ved enda lavere temperaturer. Likevel står det i databladet for utedelen med fire innedeler at driftsområdet er fra  $-15^{\circ}\text{C}$  til  $24^{\circ}\text{C}$ . Derfor kan det tenkes at COP-verdiene for temperaturer under  $-15^{\circ}\text{C}$  burde vært tilnærmet 1 når det brukes fire innedeler og at scriptet gir en unaturlig høy COP-verdi for kalde dager. Dette gjør at besparelsen er høyere enn hva som egentlig er mulig. Den installerte effekten er lavere enn den totale kapasiteten fra databladet, og dette skyldes at det er medregnet noe varmetap fra rør i de oppgitte PI-verdiene. Likevel er nok tapet større i virkeligheten. I tillegg vil det høye transmisjonstapet gjennom vegger og vinduer gjøre at ikke all besparelsen fra varmepumpa kommer til nytte.

### 4.3.4 Romoppvarmingsandel

Det kan diskuteres om romoppvarmingsandelen benyttet i varmepumpeberegningen er den mest korrekte verdien for studentbyen. Kildene fra Kapittel 2.3 oppgir oppvarmingsandeler som varierer fra 53 % til 67 %. Verdiene er gitt for ulike årstall, og fordelingen av strømforbruk har endret seg med årene. En av grunnene til dette kan være teknologiutviklingen for elektriske apparater. Siden elbillading og klesvask ikke er aktuelt for Karinelund ble den

høyeste romoppvarmingsandelen på 67 % valgt. Dette ga en besparelse på 52 %. Besparelsen fra varmpumpene hadde blitt mindre dersom romoppvarmingsandelen var lavere. Med en romoppvarmingsandel på 53 % blir besparelsen 41 %. Siden oppvarmingsandelen går ned med 14 % mens besparelsen kun går ned med 11 %, tilsier det at besparelsen ikke senkes med 1 % for hver prosentandel romoppvarmingsgraden senkes. Etter å ha testet for ulike romoppvarmingsandeler viser det seg likevel at parameterne er proporsjonale og besparelsen vil øke med omtrent 0,78 % for hver prosent romoppvarmingsandelen økes.

For å kunne beregne potensialet til varmpumpene er hver leilighet forenklet til et stort rom. Den oppvarmede luften vil sirkulere bedre enn i et reelt tilfelle, siden det ikke er vegger som deler opp leiligheten til flere rom. Luftstrømmen gjennom ventilasjonslukene i leiligheten vil være så liten at det reelt sett kun er kjøkkenet som kan utnytte varmen fra varmpumpa. Det vil være svært komplisert å finne luftgjennomstrømmingene mellom de ulike rommene i leilighetene, siden denne mengden vil variere med hvem som bor der og hvor ofte dørene mellom rommene står åpne. Siden hele leilighetene er sett på som ett rom, vil det heller ikke tas hensyn til at de ulike rommene kan ha forskjellige temperaturer. Andelen av romoppvarmingen som kan dekkes av varmpumpa er sannsynligvis for høy, og i virkeligheten vil panelovnene måtte stå for en større del av oppvarmingen.

#### 4.3.5 Temperaturer

En utetemperatur på 17°C er satt som grense for når det er et oppvarmingsbehov. Dette gjør at oppvarmingsbehovet er lik null dersom døgnetts gjennomsnittstemperatur er 17°C eller høyere. På disse dagene antas det at energiforbruket skyldes annet elektrisk utstyr og oppvarming av tappevann. Besparelsen med varmpumpe øker ved å definere en høyere temperaturgrense da varmpumpa dekker deler av forbruket flere dager i året. Det motsatte skjer dersom det antas at det er null oppvarmingsbehov på dager som er kaldere enn 17°C fordi strømmettet må dekke 100 % av det oppgitte forbruket. Varmepumpene vil derfor ikke gi en besparelse på dagene uten oppvarmingsbehov.

Med antagelsen om null oppvarmingsbehov for dager med over 17°C, er det gitt at innetemperaturen i alle bygningene er omtrent 20°C som forklart i Kapittel 3.2.1. Siden det kun bor to studenter i hver leilighet, vil muligens varmetilskuddet fra personene ikke være stort nok til å øke temperaturen med tre grader. Dette kan gi store feilkilder da beboerne innad i en bolig kan ha helt ulike innetemperaturer i leilighetene. Siden forbruket er oppgitt for hver av bygningene, og ikke for hver leilighet, vil det være vanskelig å definere en riktig innetemperatur i scriptet. Feilkilden fra den antatte romoppvarmingsandelen kunne vært unngått dersom oppvarmingsforbruket hadde blitt kalkulert ved å bruke ligningene fra Kapittel 2.3.1. Likevel vil ikke innetemperaturen være konstant, og den vil kunne endre seg etter preferansene til leietakerne.



## 4.4 Solberegninger

Solcelleanlegget vil ha høyest produksjon i mai, juni og juli. Disse månedene har også det laveste forbruket. Det kan derfor diskuteres om det er nyttig å installere et produksjonssystem som vil produsere mest energi i de tidsperiodene hvor det er færrest som kan benytte seg av energien. Siden forbruket er lavest når produksjonen er størst over lengre perioder, vil batteriet bli fulladet slik at deler av overskuddet må mates til kraftnettet. Dette gjør også at effektgrensene for plusskunder overskrides i juni og juli for flere av scenarioene, som vil gi økonomiske ulemper for plusskunden.

De sørvendte takflatene på bolig 151, 153 og 155 generer mest strøm. Disse tre takene har samme orientering og like mye tilgjengelige takareal. Uten skygge står disse tre takene for omtrent 44 % av den totale produksjonen. Ved skygge står de for 34 % av den samlede produksjonen. Bolig 157, 159A vest og 159B produserer omtrent like mye, selv om de ikke har lik orientering. Det er den østvendte takflaten til 159A som produserer minst energi gjennom året. Likevel har bolig 159A den høyeste produksjonen totalt siden begge takflatene er dekket av solcellepaneler.

Scenarioet som vil benytte flest kilowattimer fra produksjonen til å dekke forbruket er SC1, etterfulgt av SC2, siden disse scenarioene har det høyeste forbruket. SC1 produserer mer strøm enn SC2 og vil derfor ha flere kilowattimer energi tilgjengelig. Det er i SC3a at flest kilowattimer fra produksjonen går til opplading av batteriene. Dette kan forklares ved at dette scenarioet har kombinasjonen av høyest produksjon, lavest forbruk og mest batterikapasitet. SC3b har samme produksjon og forbruk, men siden energilageret kun er halvparten så stort vil det benyttes omtrent 10 000 kWh mindre solkraft til opplading av batteriene i dette scenarioet. Scenarioet som har mest overskuddsproduksjon tilgjengelig til å lade opp batteriet vil også ha mest strøm fra batteriet til å dekke forbruket, selv om det totale batteritapet øker med antall ganger batteriet lades opp. Det er derfor SC3a som dekker mest av forbruket med energi fra batteriet.

Av alle scenarioene er det SC3b som mater inn mest energi til kraftnettet. Dette er fordi scenarioet har høy produksjon, lite lagringskapasitet og lavt forbruk. I SC3a brukes det mer egenprodusert kraft til energilagring siden energilagringkapasiteten er dobbelt så stor. FV-systemet i SC1 og SC2 må importere mest strøm fra kraftnettet siden det er høyest forbruk i disse scenarioene. Både SC3a og SC3b benytter cirka 60 % mindre energi fra kraftnettet.

### 4.4.1 Effekten av skygge

Det er stor differanse på produksjonen i simuleringen med og uten trær. Skyggen fra trærne gjør at den årlige produksjonen til anlegget synker med omtrent 23 000 kWh. Scenarioene uten trær blir også påvirket av skygge fra piper og andre boliger, men det utgjør ikke en stor del av det årlige utbyttet. Alle takflatene får lavere energiproduksjon i scenarioet med skygge, selv om det kun er fire av de syv byggene som har trær rett utenfor ytterveggene. Dette kan skyldes at skyggene vil kunne treffe panelene langt unna når sola står lavt på himmelen. Som vist i Figur 3.12 er det bygningene nærmest trærne, bolig 151, 153 og 155, som blir mest påvirket av skygge.

Produksjonen fra solcellene er som forventet høyest i scenarioene uten trær. Dette gjør også

at SC1, SC3a og SC3b har en høyere solfraksjon enn SC2. Siden solfraksjonen avhenger av produksjon og forbruk vil solfraksjonen være like stor i SC3a og SC3b, og høyere enn i SC1. I scenario 3 kan 61,9% av forbruket dekkes av produksjon fra solcelleanlegget. Forskjellen mellom SC1 og SC3 er på 32,3% og skyldes kun at forbruket i SC3 omtrent er halvert i forhold til SC1.

I simuleringene uten trær produserer 151 omtrent 7100 kWh mer i året enn den østvendte takflaten til 159A, men med skygge vil takflaten 159A øst være mest lønnsom energimessig. For simuleringen uten trær reduseres det årlige utbytte til hele Karinelund med 2,4 % på grunn av skygge. I simuleringen med trær, reduserer det årlige utbyttet med ytterligere 16,5 %.

Programvaren inneholdt kun muligheten til å velge mellom løv- og bartre. Trærne som benyttes i simuleringen har en annen form enn bjørk, som er det treslaget som finnes i studentbyen, og dette vil kunne gi upresise beregninger. Trærne i simuleringen er lagt inn med samme diameter på trekrona, det er kun høyden på trærne som er ulik. Dette er en potensiell feilkilde da høyde og diameter i realiteten ofte henger sammen. I tillegg til dette kan lysgjennomslippet for bjørketrær være høyere eller lavere enn programvarens standardverdier. Selv om standardverdiene tar hensyn til at løvtrær mister bladene på høsten, er det ikke sikkert verdiene stemmer for norske årstider. Lysgjennomslippet fra trærne vil kunne påvirke solinnstrålingen på panelene betydelig.

#### 4.4.2 Plusskunde

Som nevnt tidligere vil løsningen med å installere solceller på takene i studentbyen være mest gunstig dersom den nye ordningen for deling av overskuddproduksjon for samme gårdsnummer innføres. Dagens ordning tilsier at hvert bygg kan gjøre ett av to alternativ: Enten kan kun en av leilighetene i hvert bygg benytte den produserte strømmen, eller så kan takflaten deles i åtte deler slik at hver leilighet får et eget produksjonsanlegg. I det første alternativet er det stor sannsynlighet for at produksjonsoverskuddet etter forbruk er stort, og sjansene er dermed høye for at grensene for innmatet effekt på kraftnettet overskrides. Alternativ to vil gjøre installasjonen dyrere, siden det trengs åtte vekselrettere for hvert bygg, én til hver av leilighetene.

Karinelund studentby vil kunne benytte seg av forslaget til den nye plusskundeordningen. Studentbyen kan dele strømproduksjonen mellom alle byggene, siden bygningene har samme gårds- og bruksnummer. Grensen foreslått av RME for installert effekt på hver eiendom er på 500 kWp og Karinelund er innenfor kravene med en total installert effekt på 150 kWp. Det siste kravet i plusskundeordningen er at innmatet effekt ikke kan overskride 100 kW, men i flere av scenarioene er det dager hvor det mates inn mer effekt på kraftnettet enn hva ordningen tillater. Denne grensen brytes oftest i juni og juli, som er de månedene med lavest forbruk og høyest produksjon. Dersom effektgrensen overskrides kan anlegget ikke være en del av plusskundeordningen, og konsekvensene blir at studentbyen må betale fastledd for innmating av kraft på nettet.

Det er kun SC2 som er innenfor kravene om effektinnmating for plusskundeordningen, da den innmatede effekten er under 100 kW alle timene produksjonsoverskuddet selges til kraftnettet. Dette er på grunn av at FV-systemet i dette scenarioet har lavest kraftproduksjon og dermed

færrest kilowattimer overskudd. I SC1 er det flere dager i juli og august hvor det selges kraftmengder oppunder 100 kW, men det er kun to dager i løpet av 2022 hvor innmatingen overskrider grensen. Produksjonsoverskuddet vil variere fra år til år på grunn av solforholdene og forbruksendringer. Derfor vil FV-systemene i de ulike scenarioene kunne mate både mer og mindre effekt til kraftnettet i andre år.

I SC3a og SC3b er det henholdsvis 16 og 17 dager hvor det selges mer enn tillatt mengde effekt per time tilbake til nettet. Forskjellen mellom disse resultatene skyldes at scenarioene har ulik batterikapasitet. Som i scenario 1 har begge disse scenarioene flere dager med innmating på nettet oppunder 100 kW, så i andre år kan det også her forekomme flere eller færre dager hvor regelen brytes.

#### 4.4.3 Modellering av FV-systemet

Som nevnt i Kapittel 3.1.1 manglet det byggtekniske tegninger med mål, så dimensjonene til byggene er funnet ved hjelp av forholdstall på tegningen i Figur 3.2. Disse målene vil ikke være nøyaktige ned på et centimetersnivå, og ved å legge inn forholdstallene beregnes vinklen på taket til å være mellom  $22,9^\circ$  og  $23,2^\circ$  avhengig av hvilke centimeterverdier som benyttes. Som vist i Tabell 3.1 ser det ut som byggets mønehøyde er mer nøyaktig enn de andre målene. Det er antatt at takvinkelen er  $23^\circ$ , og derfor beregnes mønehøyden i PV\*SOL til å bli 7,086 meter som er 1,486 meter høyere enn gesimshøyden. Ved å sette takvinkelen til  $23^\circ$  og bruke Pytagoras for å finne lengdene i trekanten som dannes mellom takstolen og taksperrene vil en av lengdene i trekanten ha falsk nøyaktighet. Feilen påvirker antallet solcellepanel i minst grad dersom det er differansen mellom mønehøyden og gesimshøyden som er for nøyaktig. Dersom det hadde vært en av lengdene som påvirker takarealet som hadde hatt mest usikkerhet, kunne feilkilden blitt mer avgjørende for resultatet.

Det er ikke lagt til mer kantavstand i simuleringen enn det som er anbefalt av *NEK 400* for at hvert av takene skal maksimere arealutnyttelsen. Den årlige energiproduksjonen fra et anlegg vil, som vist i Ligning 2.20, øke dersom arealet øker og de andre faktorene forblir det samme. Den årlige produksjonen hadde blitt noe mindre dersom kantavstanden hadde vært større, men en større sikkerhetsavstand hadde til gjengjeld gjort anleggene mindre utsatt for vær og vind. Det vil også være mer estetisk å ha litt avstand fra panelene til kanten av taket, da dette vil gjøre anlegget mer usynlig fra bakkenivå.

Det er høy sannsynlighet for at en student har et forbruksmønster på energi som resten av den norske befolkningen, med høyest effektforbruk på morgenen og på kvelden. Dette gjør at det er mest optimalt å installere øst- eller vestvendte solceller slik at produksjonen er høyest tidlig på dagen og sent på ettermiddagen. Ulempen med disse retningene er at de gir lavere årsproduksjon enn sørvendte paneler. Det er tre av takflatene med solcellepaneler som er vest- og østvendt, et på bolig 149 og to på bolig 159A. De resterende fem anleggene er sørvendte og vil derfor produsere mest strøm midt på dagen, når forbruket generelt sett er lavt. Siden flertallet av panelene har produksjonsstopp på tidspunkter hvor forbruket er lavt lønner det seg å lagre denne energien og bruke den ved senere anledninger.

Solcellepaneler vil produsere mer strøm på vinterhalvåret desto brattere vinkel panelene har. Det kan derfor argumenteres for at panelene burde vært montert med en brattere vinkel i forhold til taket. Da hadde produksjonen blitt høyere i de periodene hvor forbruket er høyest, i stedet for at produksjonen på sommeren blir så høyt at overskuddet mates inn på kraftnettet. Dersom panelene ikke hadde vært montert parallelt med taket er det sjans for at panelene kunne skyggelagt hverandre, og det er ikke sikkert at arealutnyttelsen av takene hadde vært like god. Det vil også kunne samle seg snø mellom panelradene, i tillegg til at installasjonen vil være mer synlig og dermed mer sjenerende for naboer og beboere.

#### 4.4.4 Valg av panel og inverter

Det er valgt å installere paneler med høy effekt på takene, siden disse panelene vil produsere mer energi enn paneler med lavere effekt dersom alle andre forhold er like. Dette er årsaken til at det er benyttet et 400 W panel i stedet for den samme panelmodellen med en effekt på 375 W. Panelene fra Longi er laget av monokrystallinsk silisium, som er den typen solceller som har høyest virkningsgrad. Det valgte panelet har en virkningsgrad på 20,5%, som er en relativt god verdi med tanke på at den teoretiske grensen for solcellers virkningsgrad som vist i Kapittel 2.7.5.

Vekselretteren som er benyttet i simuleringen vil kunne påvirke effektiviteten til systemet. I PV\*SOL er det benyttet en stringveksleretter fra leverandøren GROWATT, og et av argumentene for å bruke stringveksleretter er at den har høyere virkningsgrad enn en mikroveksleretter. Stringveksleretteren vil dermed ha mindre tap i omformingen fra likestrøm til vekselstrøm og på denne måten være mer effektiv. Derimot burde det i teorien vært benyttet mikrovekslerettere i scenarioet med skygge siden det er den vekselretteren hvor skyggelegging påvirker effektproduksjonen i minst grad. Dersom hvert av panelene hadde hatt en egen mikroveksleretter ville de ikke blitt påvirket av produksjonen til de nærliggende panelene. I SC2 kunne dermed solcelleanleggene ha produsert en høyere effekt enn det som er gjort i simuleringen med stringveksleretteren.

Siden Karinelund for øyeblikket har en del trær som vil skygge for panelene på flere av takene kunne det vært hensiktsmessig å benytte mikroinvertere, men det er antageligvis både enklere og billigere for Sit å hugge ned trærne. Det er trærne som utgjør den største årsaken til skyggelegging, selv om hele systemet også har noe tap fra skyggelegging i alle scenarioene.

#### 4.4.5 Tap fra tilsmussing

Simuleringen er kjørt uten å legge inn tap som følge av tilsmussing og snø. I virkeligheten vil det være en enda lavere produksjon fra november til mai enn det simuleringen gir, siden det kan bli liggende snø på panelene i disse månedene. Antageligvis er tapet størst fra desember til mars, da disse månedene har høyest sannsynlighet for snøfall. I følge PV\*SOL kan tilsmussingstap neglisjeres dersom det er jevnlig nedbør og helningen på panelene er over 20°. Siden det er jevnlig nedbør i form av regn i Trondheim i tillegg til at taket har en vinkel på 23°, kan tapet i utgangspunktet neglisjeres. En mer komplett simulering måtte lagt inn tap fra tilsmussing de

månedene med snøfall, men ikke for de resterende månedene i året. Tilsnussing ville hatt en større påvirkning på den totale energiproduksjonen fra systemet dersom det inntraff i måneder med høyere produksjon enn på vinteren. I vintermånedene er studentbyen uansett helt avhengig av å bruke strøm fra kraftnettet.

#### 4.4.6 CO<sub>2</sub>-besparelser

Siden energien fra kraftnettet kan komme fra fossile kilder, vil prosumenter kunne redusere CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til energiforbruket dersom de i stedet benytter egenprodusert strøm fra fornybare kilder. SC2 har den laveste reduksjonen i CO<sub>2</sub>-utslipp fordi dette scenarioet importerer mest energi fra nettet. SC3b har den høyeste CO<sub>2</sub>-besparelsen, med 245 kg/år mer utslippsbesparelser enn SC2. Etter SC3b følger SC1 og SC3a, men rekkefølgen på disse følger ikke sammenhengen med hvilket scenario som benytter mest energi fra kraftnettet.

SC3a burde hatt en bedre besparelse enn SC3b, siden SC3a importerer minst energi fra kraftnettet. Dette er ikke tilfellet og en av årsakene kan være at SC3a har flere batterier enn SC3b og dermed høyere utslipp som følge av produksjonsutslippene til batteriene. En av årsakene til at SC1 har en høyere besparelse av CO<sub>2</sub> enn SC3a kan være at det første scenarioet benytter flere kilowattimer av produksjon fra solcellene til forbruk.

Store deler av den norske energimiksen er fra fornybare kilder og har lave klimautslipp per produserte mengde energi. Dette gjør at CO<sub>2</sub>-besparelsen ved å benytte egenprodusert strøm fra solcellene fra PV\*SOL er ganske lav i Norge i forhold til i andre land. Denne CO<sub>2</sub>-besparelsen er kun gjeldene for energiproduksjonen og vil antageligvis bli mye høyere dersom utslippene knyttet til produksjonen av solcellene er medregnet. Derfor kan det diskuteres om NVE burde operere med verdier for de ulike fornybare kildene som også baserer seg på livsløpsanalyser av produksjonsanlegget som leverer strøm.

#### 4.4.7 Valg av batteri

Til energilagringssystemet stod det mellom tre ulike Li-ion-batterier som forklart i Kapittel ???. De minste BMZ-modellene har NMC-katode, mens den største modellen har NCA-katode. Voltfang-batteriene har også NMC-katoder, som gir batteriet lengre levetid enn NCA-batteriet som BMZ tilbyr. XOLTA-batteriene har LFP-katode som er det sikreste valget, i tillegg til at det kan ha like mange syklusliv som et NMC-batteri. Siden NCA- og NMC-batterier benytter begrensede og miljøskadelige ressurser, stiller LFP-batterier seg som den best egnede typen å benytte i stasjonære energilagringssystemer. De resirkulerte batteriene fra Voltfang peker seg ut som et bærekraftig alternativ, likevel vil reiseveien for XOLTA-batteriene være enda kortere siden disse produseres i Danmark. Nordisk produksjon og en sikker batteriteknologi gjør at XOLTA-batteriet egner seg godt til energilagring på Karinelund.

#### 4.4.8 Batteridimensjonering

Tabell 3.6 viser hvordan selvforsyningsgraden og graden av egenkonsum endrer seg med størrelse på energilageret for SC1. Med utgangspunkt i den belgiske studien som sier at et batterisystem

på 1,5-2 kWh/kWp er mest optimalt vil maksgrensen være 300 kWh batterikapasitet. To til fire stk XOLTA-batterier er innenfor dette spekteret. Et batterisystem med fire batterier har en kapasitet på 298,4 kWh og er derfor den mest optimale størrelsen. Som vist i tabellen vil egenkonsumet fortsette å øke til åtte batterier, og dette samsvarer med studien fra Aalborg der målet var å maksimere egenkonsum og det er benyttet et batteri på 3,95 kWh/kWp. For FV-systemet på Karinelund vil dette tilsvare en batterikapasitet på 592,5 kWh som er 4,3 kWh mindre enn for åtte XOLTA-batterier.

Egenkonsumet med flere enn åtte batterier vil være lavere fordi tapet fra opp- og utlading blir så store at deler av solenergien går til spille. Selvforsyningsgraden og graden av egenkonsum vil øke med henholdsvis 4,2 % og 13,9 % ved å benytte to batterier, sammenlignet med et system uten lagringsmuligheter. Effekten av å installere flere batterier er størst fra to til tre batterier der selvforsyningsgraden øker med 1,4 % og graden av egenkonsum øker med 4,9 %. Fra tre til fire batterier øker selvforsyningsgraden med mindre enn 1 % og graden av egenkonsum øker bare med 2,1 %. Siden tapsprosenten øker mer fra fire til fem batterier enn det selvforsyningsgraden og graden av egenkonsum gjør anses det ikke som hensiktsmessig å installere flere enn fire batterier.

Dersom batteriet også hadde blitt brukt til peak-shaving ved at kraftnettet hadde ladet opp batteriene i de timene hvor strømprisen er lav ville dette kunne redusere belastningen på kraftnettet i de timene med høy effekt. Dette er også en løsning som vil være mer økonomisk for kundene da timene med høyest effekt i løpet av et år ofte er de timene med høy spotpris på strømmen. På grunn av rekkefølgen som er lagt inn i PV\*SOL ved at produksjonen først benyttes til å dekke forbruket, deretter lade batteriet og til slutt selge tilbake strøm på nettet, er det ikke mulig å benytte programvaren til å beregne effekten av peak-shaving.

Som nevnt tidligere i diskusjonen har de ulike scenarioene ulike mengder tap i batterisystemene. Programvaren skiller mellom to typer tap i resultatene sine: Tap i opp- og utlading, og batteritap. Scenarioet med det laveste tapet for opp- og utlading er SC3b som også er det eneste scenarioet hvor det kun er to batterier. Det er SC3a med fire batterier som har det høyeste ladetapet, dobbelt så høyt som for SC3b. SC1 har et høyere opp- og utladingstap enn SC2, og årsaken til dette er antagelig at batteriet i SC1 lades opp flere ganger siden det scenarioet har mest overskuddsproduksjon.

For batteritapet oppgitt av PV\*SOL er det SC1 som har den høyeste verdien, fulgt av SC3b og SC2, men programvaren oppgir ikke hvordan dette tapet beregnes. Simuleringsresultatene for SC3a derimot, gir et negativt batteritap. Dette er umulig, og verdien tilsier at batteriene blir bedre over tid. Sannsynligheten er høy for at det negative tapet skyldes mangler i programvaren, og det er tatt kontakt med PV\*SOL som jobber med å finne feilen. Det negative batteritapet omgjøres til et positivt tap dersom antallet batterier i systemet reduseres til to, eller hvis systemet har 16 eller flere batterier.

Tapet internt i batteriet kan skyldes formasjonen av SEI-film som etterhvert som den bygger seg opp reduserer mengden reaktanter. Jo mer batteriet brukes, desto raskere vil det slites ut. Hvis det ses bort fra SC3a som har fått et negativt batteritap, er tapene størst for SC1, både fra

opp-og utlading og internt i batteriet, da batteriets kapasitet utnyttes mest i dette scenarioet.

#### 4.5 I forhold til nZEB og PEN

Et nullenergibygg vil oppnå et forhold på 1 mellom  $\varphi_{SS}$  og  $\varphi_{SC}$  (P og L), mens et plusshus vil oppnå et forhold på større enn 1 fordi produksjonen er større enn lagringen. Derfor må det undersøkes om Karinelund kan møte kravene til et nullutslippsnabolag før det vurderes om det kan bli et energipositivt nabolag. Tabell 3.9 viser at forholdet mellom  $\varphi_{SS}$  og  $\varphi_{SC}$ , altså solfraksjonen, er på maks 61,9 % med beregningene som er gjort. Karinelund vil derfor ikke kunne oppnå status som et nullenerginabolag, desto mindre et energipositivt nabolag.

I alle scenarioene presentert i Kapittel 3.5 er strømforbruket høyere enn produksjonen fra solcelleanlegget. Differansen er på 321 478 kWh (SC1), 344 479 kWh (SC2) og 106 341 kWh (SC3a og SC3b), og denne forskjellen må dekkes av kraftnettet. Installasjonen av batterier i systemet vil gjøre at studentbyen kan benytte seg mer av den egenproduserte strømmen, men den totale produksjonen fra anlegget er uansett lavere enn forbruket. Det er derfor ingen mulighet for at Karinelund studentby kan koble seg av nettet, uten å installere andre produksjons- og lagringsteknologier.

Energiforbruket til studentbyen er også for høyt for å kunne klassifiseres som et nesten-nullenergibygg i kategorien småhus. Kravet for Karinelund med denne klassifiseringen er et maksimalt forbruk på omtrent 175 800 kWh/år, men studentbyen har et forbruk som er 43 000 kWh for høyt selv med varmpumper. Det er bolig 159A som har det laveste forbruket i 2022, men dette bygget bruker 1612,5 kWh mer strøm enn nZEB-kravet. For å nå kravene til nesten-nullutslippsbygg må forbruket reduseres ytterligere, og i tillegg til installasjon av varmpumper er det nødvendig å oppgradere bygningskroppen med etterisolering og utskiftning av vinduer for å få ned transmisjonstapet.

#### 4.6 Kostnader

Installasjon av varmpumper, solceller og batterier vil være en dyr investering. Utgiften for å installere to varmpumper på hvert bygg er betydelig lavere enn å installere solcellepanel med tilhørende utstyr og batterier. Den høye kostnaden for FV-systemet vil bli enda høyere når monteringsprisen medregnes. Det kan også tenkes at kostnaden for systemet kunne blitt litt lavere enn oppgitt i Kapittel 3.6 siden det ofte er mulighet for å få bedre avtaler dersom man kjøper store mengder utstyr fra en leverandør. Det er også sannsynlig at den estimerte prisen på batteriene er for høy, siden prisen per kilowattime kapasitet ofte er størst for lave kapasiteter.

Varmepumpa vil kunne spare studentbyen for omtrent 240 000 kWh strøm fra kraftnettet, mens solcellene kun kan produsere cirka 135 000 kWh. Varmepumper vil være den mest lønnsomme investeringen siden det er den billigste installasjonen, i tillegg til å være det tiltaket som gjør systemet minst avhengig av kraft fra nettet. Samtidig er det viktig å påpeke at det er beregningene med varmpumpene som har mest usikkerhet.

Dersom studentbyen produserer og forbruker sin egen kraft kalles de plusskunder og det kan gi

økonomiske fordeler med tanke på strømregningen. Plusskundene trenger ikke å betale nettleie for det forbruket som dekkes av den egenproduserte strømmen. Når kraften er produsert til eget forbruk har den også fritak fra elavgiften. Dersom et produksjonsoverskudd skal mates på nettet betaler ikke plusskunden noe for dette dersom innmatet effekt er under 100 kW. Alle disse utgiftene er en del av strømregningen, og egenproduksjon vil dermed kunne gjøre regningen noe lavere. I tillegg til å redusere disse avgiftene kan plusskunder selge overskuddskraften til kraftleverandøren. Enova oppgir derimot at at solcelleanlegg er mest lønnsomme når kunden kan bruke mest mulig av den egenproduserte energien selv, og at det dermed ikke lønner seg i så stor grad å selge kraften til nettet.

Siden installasjonskostnadene er høye, vil det kunne diskuteres om energibesparelsene vil være en fordel for privatpersoners eller selskapers økonomi selv om strømregningen blir lavere. Den eventuelle økonomiske besparelsen vil være avhengig av den fremtidige strømprisen, siden høye strømpriser gir en raskere inntjening av investeringene.

#### 4.7 Videre arbeid

Med den nåværende plusskundeordningen er det ikke hensiktsmessig med produksjon fra solceller og energilagring i studentbyen. Dette er fordi ordningen kun tillater at en av leilighetene i hvert bygg benytter seg av produksjonen fra taket, eller at det må lages åtte ulike anlegg på hvert bygg. For videre arbeid burde det undersøkes om det er andre produksjons- og lagringsteknologier som er mer hensiktsmessige. Disse teknologiene burde undersøkes i forhold til både dagens regelverk og om de kan øke nabolagets selvforsyningsgrad ytterligere, slik at det kan oppnå status som minimum et nullenergibygge. Siden energibesparelsen fra installasjon av varmepumper er større enn produksjonen fra FV-systemet med batterilagring, og dermed gjør Karinelund mindre avhengig av kraftnettet, burde det undersøkes flere løsninger som senker forbruket i nabolaget. Det kan tenkes at et solfangeranlegg med termisk lagring vil være en bedre løsning på Karinelund. Solfangeren kan blant annet brukes til å varme opp tappevann, eller bidra til romoppvarming ved hjelp av en vann-til-luft varmepumpe. Et slikt system vil kunne redusere forbruket betraktelig.

Eventuelt videre arbeid burde fokusere på økonomiske analyser for å se om de tekniske løsningene er økonomisk gunstige. Økonomien vil i stor grad være avgjørende for om slike prosjekter gjennomføres i praksis. Det burde også blitt gjort livsløpsanalyser av de ulike løsningene og komponentene som brukes, da målet med energipositive nabolag og energieffektivisering av bygg er å redusere klimafotavtrykket fra boliger. Fra og med 1. januar 2030, må også alle eksisterende bygg som renoveres oppnå status som nullenergibygge. Flere leverandører og modeller på solceller, vekselrettere, batterier og varmepumper burde sammenlignes med tanke på både økonomisk kostnad og miljøpåvirkning.



## 5 Konklusjon

Målet med oppgaven var å se på muligheter for at Karinelund studentby kunne oppnå status som et energipositivt nabolag. Ved å bruke programvaren PV\*SOL er det simulert et system for energiproduksjon og -lagring bestående av to hoveddeler: Solcellepaneler på alle takflatene med gunstige solforhold og et batterisystem som kan lagre energien fra solcellene. I tillegg er MATLAB brukt for å beregne effekten av å installere varmepumper for å senke forbruket i boligene.

Nabolaget har flere sørvendte tak som gir gode solforhold, dette gjør at potensialet for solkraftproduksjon er relativt høyt. Likevel skaper skygge fra bjørketrærne i alléen ved siden av nabolaget en reduksjon i strømproduksjonen på 17 %. Ved installasjon av solcellepaneler på takene burde disse trærne hugges for at man skal kunne utnytte mest mulig solenergi.

Installasjon av luft-til-luft varmepumper i alle boligene gir en energibesparelse på 52 % av nabolagets totale forbruk i 2022. Antagelser i beregningene gjør at denne besparelsen vil være lavere i realiteten, men støtter funnene fra EU-prosjektet *EPISCOPE*. Dette prosjektet konkluderer med at kombinasjonen av solceller og varmepumpe er en god investering for å gjøre boliger mindre avhengige av å importere energi fra kraftnettet. Likevel er det tydelig fra litteraturstudiet, og variasjonen i forbruk mellom de ulike byggene i Karinelund studentby, at brukeratferd har mye å si for hvor stor energibesparelse de tekniske løsningene gir i realiteten.

Ved å benytte litium-ionbatterier i kombinasjon med det simulerte solcelleanlegget i Karinelund studentby vil graden av egenkonsumet og selvforsyningsgraden øke med henholdsvis 13,9 % og 4,2 % sammenlignet med ingen energilagring. Den maksimale graden av egenkonsum oppnås ved å installere en batterikapasitet på 4 kWh/kWp, med en enda større batterikapasitet synker graden av egenkonsum. Et forholdstall på 4 kWh/kWp gir også den høyeste selvforsyningsgraden for systemet i Karinelund studentby. For scenarioet der forbruket etter installasjon av varmepumper benyttes og et energilagringssystemet består av fire batterier, vil solcelleanlegget oppnå en grad av egenkonsum og selvforsyningsgrad på henholdsvis 65,6 og 40,6 %.

Nabolaget skårer dårlig på energimerkingsskalaen på grunn av at det bare benyttes panelovner til oppvarming og bygningskroppen aldri er energioppdatert. Ved å installere varmepumper som oppvarmingskilde kan boligene få en bedre oppvarmingskarakter. Forbruket er fortsatt for høyt til at Karinelund kan oppfylle kravet til å bli et nesten-nullenergibygg. Forbruket er også for høyt til at solfraksjonen kan bli bedre enn 61,9 %, og kravet til et nullenergibygg er 100 %. Siden Karinelund ikke møter kravene til nesten-nullenergibygg eller nullenergibygg vil studentbyen ikke kunne få status som et energipositivt nabolag.

Oppgaven tar utgangspunkt i at høringen om den nye plusskundeordningen vedtas. Den nye ordningen vil være et skritt i riktig retning med å legge til rette for utviklingen av nullenerginabolag og energipositive nabolag. Dette kan spare samfunnet for store kostnader i forbindelse med utbygging av kraftnettet, da slike nabolag vil kunne bidra til å avlaste nettet. For å nå målene om å redusere klimagassutslippene med 55 % innen 2030 er det nødvendig at

Norge satser på å utvikle energipositive bygg og nabolag, for å redusere utslippene i forbindelse med boliger og næringsbygg. For at private skal ønske å investere i energioppgradering av boligene sine må det være økonomisk gunstig, og en videreføring av denne oppgaven vil være å gjennomføre en økonomisk analyse av systemet med varmepumper, solceller og batterier. Hvis den nye plusskundeordningen ikke blir vedtatt vil det ikke være gunstig å installere et system som foreslått i denne oppgaven, da vil andre løsninger som for eksempel solfangere og termisk lagring kunne være bedre egnet.

## Referanser

- [1] Miljødirektoratet. *Hovedfunn i synteserapporten i sjette hovedrapport*. no. Mar. 2023. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/fns-klimapanel-ipcc/dette-sier-fns-klimapanel/sjette-hovedrapport/hovedfunn-syr-sjette-hovedrapport/> (sjekket 13.04.2023).
- [2] Miljødirektoratet. *Byer*. no. Okt. 2022. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/fns-klimapanel-ipcc/dette-sier-fns-klimapanel/sjette-hovedrapport/byer/> (sjekket 13.04.2023).
- [3] Miljødirektoratet. *Bygninger*. no. Jun. 2022. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/fns-klimapanel-ipcc/dette-sier-fns-klimapanel/sjette-hovedrapport/bygninger/> (sjekket 13.04.2023).
- [4] SSB. *11561: Energibalanse. Tilgang og anvendelse av energiprodukter 1990 - 2021*. no. Okt. 2020. URL: <https://www.ssb.no/statbank/table/11561/> (sjekket 10.02.2023).
- [5] Directorate-General for Energy (European Commission). *Clean energy for all Europeans*. eng. LU: Publications Office of the European Union, 2019. ISBN: 978-92-79-99835-5. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/9937> (sjekket 08.02.2023).
- [6] Miljødirektoratet. *FNs klimapanel med kraftfull rapport om klimaløsninger*. no. Apr. 2022. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/nyheter/2022/april-2022/fns-klimapanel-med-kraftfull-rapport-om-klimalosninger/> (sjekket 13.04.2023).
- [7] NVE. *Solkraft*. no. Jan. 2023. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/solkraft/> (sjekket 13.04.2023).
- [8] Olav A. Øvrebø. *Solenergi: Grafene som viser hvordan det norske markedet nå virkelig tar av*. no. Section: nyhet. Sep. 2022. URL: <https://energiogklima.no/nyhet/solenergi-grafene-som-viser-hvordan-det-norske-markedet-na-virkelig-tar-av/> (sjekket 13.04.2023).
- [9] Martin Lillebo, Henrik Kirkeby og Thor Holm. «RME Ekstern rapport». no. I: (jan. 2021), s. 78. ISSN: 2535-8243. URL: [https://publikasjoner.nve.no/rme\\_eksternrapport/2020/rme\\_eksternrapport2020\\_09.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rme_eksternrapport/2020/rme_eksternrapport2020_09.pdf).
- [10] Olje- og energidepartementet. *Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet*. Jan. 2020. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-11-30-1557> (sjekket 18.04.2023).
- [11] European Commission. *Energy performance of buildings directive*. en. Des. 2021. URL: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en) (sjekket 08.02.2023).
- [12] Tor Helge Dokka mfl. *Energieffektivisering i bygninger – mye miljø for pengene!* 2009. URL: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/sb-prrapp-40.pdf> (sjekket 08.02.2023).
- [13] Mie Fuglseth mfl. «Effekt på klimagassutslipp av økt oppgradering og ombruk». no. I: *Asplan Viak* 633923-01 (nov. 2021), s. 91. URL: [https://innlandetfylke.no/\\_f/p1/i1cde1902-faca-473d-b526-1da35c8a70ef/regional-effekt-pa-utslipp-av-okt-oppgradering-og-gjenbruk\\_241121.pdf](https://innlandetfylke.no/_f/p1/i1cde1902-faca-473d-b526-1da35c8a70ef/regional-effekt-pa-utslipp-av-okt-oppgradering-og-gjenbruk_241121.pdf).
- [14] Selamawit Mamo Fufa, Cecilie Flyen og Christoffer Venås. *Grønt er ikke bare en farge: Bærekraftige bygninger eksisterer allerede*. nob. Accepted: 2020-12-16T14:46:55Z ISSN: 1894-1583 Publication Title: 107. SINTEF akademisk forlag, 2020. ISBN: 978-82-536-1669-8. URL: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2719890> (sjekket 08.02.2023).
- [15] SSB. *Bygningsmassen*. nb. Feb. 2023. URL: <https://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/bygg-og-anlegg/statistikk/bygningsmassen> (sjekket 08.02.2023).
- [16] Olje- og energidepartementet. *Styrker innsatsen for økt energieffektivisering*. no. Pressemelding. Publisher: regjeringen.no. Okt. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/milliardsatsing-til-energieffektivisering/id2932296/> (sjekket 09.02.2023).
- [17] NVE. *Energieffektivisering i norske bygninger kan redusere energibruken tilsvarende 10 prosent av Norges strømforbruk - NVE*. no. Mar. 2021. URL: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/energieffektivisering-i-norske-bygninger-kan-reducere-energibruken-tilsvarende-10-prosent-av-norges-stromforbruk/> (sjekket 09.02.2023).

- [18] Statsministerens kontor. *Nytt norsk klimamål på minst 55 prosent*. no. Pressemelding. Publisher: regjeringen.no. Nov. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/nytt-norsk-klimamal-pa-minst-55-prosent/id2944876/> (sjekket 08.02.2023).
- [19] Klima- og miljødepartementet. *EUs klimapakke Klar for 55 (Fit for 55)*. Redaksjonellartikkel. Nov. 2021. URL: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/eus-klimapakke-klar-for-55/id2887217/> (sjekket 08.02.2023).
- [20] Council of the European Union. *Fit for 55: making buildings in the EU greener*. en. Nov. 2022. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-making-buildings-in-the-eu-greener/> (sjekket 08.02.2023).
- [21] Olje- og energidepartementet. *Forslag til revidert bygningsenergidirektiv*. no. EOSnotat. Publisher: regjeringen.no. Des. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2022/des/forslag-til-revidert-bygningsenergidirektiv/id2959442/> (sjekket 08.02.2023).
- [22] Nicholas Wilkinson. *FNs bærekraftsmål*. no. Apr. 2023. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (sjekket 08.05.2023).
- [23] Dominika Czerwinska. *Green building: Improving the lives of billions by helping to achieve the UN Sustainable Development Goals*. en-US. Nov. 2021. URL: <https://worldgbc.org/article/green-building-improving-the-lives-of-billions-by-helping-to-achieve-the-un-sustainable-development-goals/> (sjekket 16.05.2023).
- [24] SSB. *Norsk næringsliv*. ssb.no. URL: <https://www.ssb.no/nasjonaltregnskap-og-konjunkturer/faktaside/norsk-naeringsliv> (sjekket 16.05.2023).
- [25] KDD. *Fakta om nye energikrav til nybygg*. no. Redaksjonellartikkel. Publisher: regjeringen.no. Nov. 2015. URL: [https://www.regjeringen.no/no/tema/plan-bygg-og-eiendom/plan\\_bygningsloven/bygg/innsikt/faktaark-om-nye-energikrav-til-nybygg/id2461620/](https://www.regjeringen.no/no/tema/plan-bygg-og-eiendom/plan_bygningsloven/bygg/innsikt/faktaark-om-nye-energikrav-til-nybygg/id2461620/) (sjekket 09.05.2023).
- [26] Olje- og energidepartementet. *Bærekraftige bygg*. nb. Mar. 2019. URL: <https://energifaktanorge.no/et-baerekraftig-og-sikkert-energisystem/baerekraftige-bygg/> (sjekket 09.05.2023).
- [27] Grønn Byggallianse. *Nysgjerrig på BREEAM-NOR?* nb-NO. Okt. 2022. URL: <https://byggalliansen.no/sertifisering/om-breeam/nysgjerrig-pa-breeam-nor/> (sjekket 09.05.2023).
- [28] Ruth Woods, Arild Gustavsen og Katrine Peck Sze Lim. *Zeb definisjoner*. 2023. URL: <http://zeb.no/index.php/no/om-zeb/zeb-definisjoner> (sjekket 09.05.2023).
- [29] Passive House Institute. *What is a Passive House?* Sep. 2022. URL: [https://passipedia.org/basics/what\\_is\\_a\\_passive\\_house](https://passipedia.org/basics/what_is_a_passive_house) (sjekket 09.05.2023).
- [30] Per Rygh. *passivhus*. no. Mai 2021. URL: <https://snl.no/passivhus> (sjekket 09.05.2023).
- [31] Standard Norge. *Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Boligbygninger*. Jan. 2013. URL: <https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=636902> (sjekket 16.05.2023).
- [32] Kommunal- og Regjeringen. *Forskrifter til plan- og bygningsloven*. no. Innhold. Publisher: regjeringen.no. Feb. 2018. URL: <https://www.regjeringen.no/no/tema/plan-bygg-og-eiendom/bygningsregelverket-fra-1965--20172/forskrifter/id2590708/> (sjekket 09.05.2023).
- [33] Kommunal- og moderniseringsdepartementet. *Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift)*. Jun. 2017. URL: <https://lovdata.no/dokument/LTI/forskrift/2017-06-19-840> (sjekket 09.05.2023).
- [34] Kommunal og arbeidsdepartementet. *Byggeforskrift 1985 - Lovdata*. Jan. 1985. URL: <https://lovdata.no/dokument/LTI/forskrift/1984-11-15-1892> (sjekket 09.05.2023).
- [35] Kommunal og arbeidsdepartementet. *Byggeforskrift 1987 - Lovdata*. Jan. 1987. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF0/forskrift/1987-05-27-458> (sjekket 09.05.2023).
- [36] Forbrukerrådet. *Energimerking*. nb-NO. Sep. 2015. URL: <https://www.forbrukerradet.no/merkeoversikten/miljo/energimerking/> (sjekket 09.05.2023).
- [37] Ingvild Sjøvold Nilsen. *Nye energietiketter i 2021*. no. Jun. 2022. URL: <https://www.nve.no/energi/virkemidler/okodesign-og-energimerking-av-produkter/nye-energietiketter-i-2021/> (sjekket 09.05.2023).

- [38] DiBK. *Hva sier energimerket om boligen din?* no. Mai 2018. URL: <https://dibk.no/bygge-eller-endre/puss-opp-energismart/hva-sier-energimerket-om-boligen-din> (sjekket 09.05.2023).
- [39] EPBD. *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.* en. Legislative Body: OP\_DATPRO. Des. 2018. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/2018-12-24/eng> (sjekket 11.04.2023).
- [40] Regjeringen. *Rettleiing om utrekning av primarenergibehov i bygninger og energirammer for nesten nullenergibygningar.* nn-NO. Pressemelding. Publisher: regjeringen.no. Jan. 2023. URL: <https://www.regjeringen.no/nn/aktuelt/rettleiing-om-utrekning-av-primarenergibehov-i-bygninger-og-energirammer-for-nesten-nullenergibygningar/id2961158/> (sjekket 11.04.2023).
- [41] Ragni Fjellgaard Mikalsen, Christian Sesseng og Karolina Storesund. «Energieffektive bygg og brannsikkerhet». en. I: 2019:02 (2019). ISSN: 978-91-88907-16-5.
- [42] Regjeringen. *Veiledning om beregning av primarenergibehov og nesten nullenergibygging.* URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/60e8f8ec02e246079f4af4d9578d78c2/veiledning-om-beregning-av-primarenergibehov-og-nesten-nullenergibygging.pdf> (sjekket 11.04.2023).
- [43] Berit Tennbakk. «Grønn rehabiliteringsbølge i Norge». I: THEMA Rapport 2021-01 EFO-21-01 (sep. 2021), s. 34. ISSN: 978-82-8368-083-6. URL: <https://www.nelfo.no/siteassets/te-21-01-gronn-rehabiliteringsbolge-i-norge.pdf> (sjekket 09.05.2023).
- [44] Marianne Wiik mfl. *ZERO EMISSION NEIGHBOURHOODS IN SMART CITIES.* 2022. URL: [https://fmezen.no/wp-content/uploads/2023/02/ZEN-Report-no-45\\_.pdf](https://fmezen.no/wp-content/uploads/2023/02/ZEN-Report-no-45_.pdf) (sjekket 11.04.2023).
- [45] EU. *EU Taxonomy Navigator.* en. URL: <https://ec.europa.eu/sustainable-finance-taxonomy/activities/activity/224/view> (sjekket 06.04.2023).
- [46] Cultural-E, syn.ikia og EXCESS. *Understanding Positive Energy Buildings and Neighbourhoods towards a common definition.* Feb. 2023. URL: <https://www.synikia.eu/wp-content/uploads/2023/02/Understanding-Positive-Energy-Buildings-and-Neighbourhoods-towards-a-common-definition.pdf> (sjekket 11.04.2023).
- [47] Johannes Brozovsky, Arild Gustavsen og Niki Gaitani. «Zero emission neighbourhoods and positive energy districts – A state-of-the-art review». en. I: *Sustainable Cities and Society* 72 (sep. 2021), s. 103013. ISSN: 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103013. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721002973> (sjekket 06.04.2023).
- [48] syn.ikia. *5S strategi.* nb-NO. Jan. 2022. URL: <https://www.synikia.eu/no/5s-strategi/> (sjekket 09.05.2023).
- [49] Yi Jiang mfl. *China Building Energy Use 2018.* Des. 2018. URL: [https://www.researchgate.net/publication/337160052\\_China\\_Building\\_Energy\\_Use\\_2018](https://www.researchgate.net/publication/337160052_China_Building_Energy_Use_2018).
- [50] Andersen. *Normalt strømforbruk — Gjennomsnittlig etter kvm (i 2023).* nb-NO. Aug. 2022. URL: <https://forbrukerguiden.no/normalt-stromforbruk/> (sjekket 09.05.2023).
- [51] Elise Årdal. *Hva er et normalt strømforbruk — Tibber Magazine.* nb-NO. Des. 2022. URL: <https://tiber.com/no/magazine/power-hacks/normalt-stromforbruk> (sjekket 09.05.2023).
- [52] Trøndelag Kraft. *Gjennomsnittlig strømforbruk.* URL: <https://www.trondelagkraft.no/strom/stromforbruk/gjennomsnittlig-stromforbruk/> (sjekket 09.05.2023).
- [53] Fjordkraft. *Strømforbruk i enebolig — Normalt strømforbruk.* nb. URL: <https://www.fjordkraft.no/strom/stromforbruk/enebolig/> (sjekket 09.05.2023).
- [54] Nicolai Feilber og Bjørn Grinden. *Ny kunnskap om fordeling av strømforbruk.* Des. 2008. URL: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/energi/nyhetsbrev/ny-kunnskap-om-fordeling-av-stromforbruket.pdf>.
- [55] Elvia. *Hva bruker mest strøm?* no. URL: <https://www.elvia.no/nettleie/alt-du-ma-vite-om-ny-nettleie-for-2022/hva-bruker-mest-strom/> (sjekket 26.04.2023).
- [56] Ellen Synnøve Viseth. *Hva bruker mest strøm hos deg.* Okt. 2021. URL: <https://www.tu.no/artikler/hva-bruker-mest-strom-hjemme-hos-deg/514365> (sjekket 26.04.2023).
- [57] Malin Wikum mfl. *Har vi fleksibilitet nok til å balansere kraftsystemet fram mot 2050?* Jun. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/5f15fcec3143d1bf9cade7da6afe6e/no/sved/vedlegg4.pdf>.

- [58] Fornybar Norge. *Vi bruker strøm hele døgnet. Hva skulle vi gjort uten?* 2021. URL: <https://www.fornybar norge.no/stromguiden/ditt-stromforbruk/> (sjekket 16.05.2023).
- [59] Jacob J Lamb og Bruno G Pollet. *Energy-Smart Buildings- Design, construction and monitoring of buildings for improved energy efficiency.* en. Renewable and sustainable power. IOP Publishing, 2020. ISBN: 978-0-7503-3257-6.
- [60] Helmut Ormestad, Bjørn Pedersen og Lars Egil Helseth. *varmeledning.* no. Jan. 2023. URL: <https://snl .no/varmeledning> (sjekket 16.05.2023).
- [61] T. L. Bergman mfl. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* en. Google-Books-ID: vvyIoXEywMoC. John Wiley & Sons, apr. 2011. ISBN: 978-0-470-50197-9.
- [62] Knut A. Rosvold. *passiv solvarme.* no. Jan. 2023. URL: [https://snl.no/passiv\\_solvarme](https://snl.no/passiv_solvarme) (sjekket 16.05.2023).
- [63] Atle Abelsen mfl. *Fornybar energi 2007.* nob. Accession Number: 990704193294702202 Publication Title: Norbok Source: NO-OsNB Type: book. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat, 2007. URL: [https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb\\_digibok\\_2011092108129](https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2011092108129) (sjekket 16.05.2023).
- [64] Norsk VVS Energi- og Miljøteknisk Forening. *Bygningers varmeeffektbehov.* nb-no. Section: vannbaserte. Aug. 2019. URL: <https://vannbaserte.nemitek.no/bygningers-varmeeffektbehov-kapittel-11-vann baserte-oppvarmings-og-kjolesystemer-2014/generelt/165384> (sjekket 11.05.2023).
- [65] Dr. Andrew M Lang. *Worked examples of U-value calculations using the Combined Method.* Jun. 2007. URL: <https://www.gov.scot/binaries/content/documents/govscot/publications/advice-and-guidance/2020/02/tables-of-u-values-and-thermal-conductivity/documents/6-b---worked-examples-of-u-value-calculations-using-the-combined-method/6-b---worked-examples-of-u-value-calculations-using-the-combined-method/govscot%3Adocument/6.B%2B-%2BWorked%2Bexamples%2Bof%2BU-value%2Bcalculations%2Busing%2Bthe%2Bcombined%2Bmethod%2B%2B.pdf> (sjekket 18.05.2023).
- [66] Passive House Institute. *Definition and effects of thermal bridges.* Jul. 2022. URL: [https://passipedia.org/basics/building\\_physics\\_-\\_basics/thermal\\_bridges/thermal\\_bridge\\_definition](https://passipedia.org/basics/building_physics_-_basics/thermal_bridges/thermal_bridge_definition) (sjekket 11.04.2023).
- [67] Lavenergiprogrammet. *Slik gjør du en kuldeberegning.* nb. Des. 2018. URL: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/slik-gjor-du-en-kuldeberegning/www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/slik-gjor-du-en-kuldeberegning/> (sjekket 11.04.2023).
- [68] Tianzhen Hong mfl. «Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture». en. I: *Building and Environment* 114 (mar. 2017), s. 518–530. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.12.006. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316304851> (sjekket 11.05.2023).
- [69] J.F. Nicol og M.A. Humphreys. *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings.* en. 2002. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00006-3. URL: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0378778802000063?token=37C86BAF5C1D72B3526402FEFDFA32BCCD17F9A2B4E72BD078CB30CF852BE4C07B9047A6AF3A9F9477CB0553F5AA3C01&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230511082621> (sjekket 11.05.2023).
- [70] Da Yan og Tianzhen Hong. *IEA-EBC Annex 66.* Jul. 2018. URL: <http://www.annex66.org/> (sjekket 02.03.2023).
- [71] Claire Far, Iftekhar Ahmed og Jamie Mackee. «Significance of Occupant Behaviour on the Energy Performance Gap in Residential Buildings». en. I: *Architecture* 2.2 (jun. 2022). Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, s. 424–433. ISSN: 2673-8945. DOI: 10.3390/architecture2020023. URL: <https://www.mdpi.com/2673-8945/2/2/23> (sjekket 02.03.2023).
- [72] Rune Andersen. «The influence of occupants' behaviour on energy consumption investigated in 290 identical dwellings and in 35 apartments». en. I: (2012). URL: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/9903893/prod11341246329792.HB2012\\_ExtAbstract\\_RKA\\_nr\\_3.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/9903893/prod11341246329792.HB2012_ExtAbstract_RKA_nr_3.pdf).
- [73] Grini Grini og Isak Oksvold. «Kostnadseffektive energiltak i eksisterende bygg». no. I: (jan. 2017), s. 30. URL: <https://dibk.no/globalassets/02.-om-oss/rapporter-og-publikasjoner/hvordan-spare-10twh-i-eksisterende-bygg--litteraturstudie.pdf>.

- [74] Bjørn Borgaas. *Jevons paradoks*. nb. Jun. 2023. URL: [https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/energi/energibloggen/jevons-paradoks/](https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/energi/energibloggen/jevons-paradoks/www.tekna.no/fag-og-nettverk/energi/energibloggen/jevons-paradoks/) (sjekket 11.05.2023).
- [75] Joachim Seehusen. *Energisparing gjennom effektivisering er en illusjon*. Mai 2013. URL: <https://www.tu.no/artikler/energisparing-gjennom-effektivisering-er-en-illusjon/233441> (sjekket 11.05.2023).
- [76] Bente Halvorsen. «Utviklingen i strømforbruket, prisleisomheten og strømmarkedet». no. I: (jan. 2012). ISSN: 0806-2056. URL: [https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/rapp\\_201202/rapp\\_201202.pdf](https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/rapp_201202/rapp_201202.pdf).
- [77] Hanne Marit Dalen og Bente Halvorsen. «Økonomiske konsekvenser av høye kraftpriser og strømstønad. En empirisk studie av stønadsberettigede husholdninger,» no. I: (sep. 2022). ISSN: 0806-2056. URL: [https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/artikler/okonomiske-konsekvenser-av-hoye-kraftpriser-og-stromstonad/\\_/attachment/inline/9a39ac2d-f93a-41b4-80e2-5b38ddd7ad2b:71b9050840159e1478462581eaac6c03ebb8d40f/RAPP2022-36.pdf](https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/artikler/okonomiske-konsekvenser-av-hoye-kraftpriser-og-stromstonad/_/attachment/inline/9a39ac2d-f93a-41b4-80e2-5b38ddd7ad2b:71b9050840159e1478462581eaac6c03ebb8d40f/RAPP2022-36.pdf).
- [78] NVE. *Høy strømpris har gitt redusert forbruk*. no. Feb. 2022. URL: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/hoye-stroempris-har-gitt-reduisert-forbruk/> (sjekket 11.05.2023).
- [79] Sindre Østby Stub og Kristin Antonsen Brenna Brenna. «SLIK KUTTER VI ENERGIBRUKEN I BYGG. Virkemidler for energieffektivisering som tar oss til 10 TWh». I: (2017), s. 32. ISSN: ISBN 978-82- 93587-01-9. URL: <https://zero.no/wp-content/uploads/2017/08/Energisparing-i-bygg-1-1.pdf> (sjekket 11.05.2023).
- [80] Sivert Uvsløkk. *Mye å spare med nytt glass*. no. Nov. 2011. URL: <https://www.huseierne.no/hus-bolig/tema/oppussing/vindu-mye-a-spare-med-nytt-glass/> (sjekket 11.05.2023).
- [81] Enova. *Luft-til-luft-varmepumpe — Reduser energiutgiftene*. nb-NO. Des. 2016. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/luft-til-luft-varmepumpe/> (sjekket 11.05.2023).
- [82] TOSHIBA. *Hvor mye strøm kan jeg spare med en varmepumpe?* no. Section: Spørsmål og svar. Feb. 2023. URL: <https://www.toshibavarmepumper.no/sporsmal-og-svar/hvor-mye-strom-kan-jeg-spare-med-en-varmepumpe/> (sjekket 11.05.2023).
- [83] Pål Strandbakken, Nina Heidenstrøm og Gunnar Vittersø. *Energisparende teknologier i norske husholdninger: Luft til luft varmepumper*. Tekn. rapp. Fagrapport nr. 5-2015. STATENS INSTITUTT FOR FORBRUKSFORSKNING, 2015, s. 180. URL: [https://oda.oslomet.no/oda-xmlui/bitstream/handle/20.500.12199/5312/file80362\\_fagrapport\\_nr.\\_5-2015\\_-\\_varmepumperapport.pdf?sequence=1](https://oda.oslomet.no/oda-xmlui/bitstream/handle/20.500.12199/5312/file80362_fagrapport_nr._5-2015_-_varmepumperapport.pdf?sequence=1) (sjekket 01.05.2023).
- [84] Heidi Juhler, Monica Havskjold og Ida H Bryn. «Energi Norge og Norsk Fjernvarme». no. I: (nov. 2020), s. 28. URL: <https://www.fornybarnorge.no/contentassets/e84808c79a6e459ea450062ab4ba5c31/rapp-ort-kostnader-vannbaren-varme-i-leilighetsbygg.pdf>.
- [85] Naturvernforbundet. *Vannbåren varme - energismart*. no. Jan. 2017. URL: <https://www.energismart.no/vannbaren-varme/category1062.html> (sjekket 12.05.2023).
- [86] Enova. *Vannbåren varme — Energitiltak — Varmepumper*. nb-NO. Des. 2016. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/vannbaren-varme-/> (sjekket 11.05.2023).
- [87] Ole Petter Wie. *Vannbåren varme: En komplett guide 2021*. nb-NO. Apr. 2021. URL: <https://www.abby.no/vannbaren-varme-en-komplett-guide-2020-2021/> (sjekket 12.05.2023).
- [88] Statkraft. *Vannbåren varme og strømforbruk: Noen klare fordeler*. no. Okt. 2022. URL: <https://www.statkraftvarme.no/kunnskapssenter/vannbaren-varme/stromforbruk-noen-klare-fordeler/> (sjekket 12.05.2023).
- [89] Norsk fjernvarme. *Fjernvarme energikilder 2022*. no. 2022. URL: <https://www.fjernkontrollen.no/> (sjekket 12.05.2023).
- [90] Monica Havskjold. *Vannbåren varme gir ikke økte priser på boliger*. no. Apr. 2023. URL: <https://www.energiaktuel.no/cppage.6524708-575505.html> (sjekket 12.05.2023).
- [91] Enova. *Varmestyringssystem — Energitiltak*. nb-NO. Des. 2016. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/reducere-eller-styre-stromforbruket/varmestyringssystem/> (sjekket 20.05.2023).
- [92] Huseiernes Landsforbund. *Slik kan du enkelt spare strøm*. no. Okt. 2018. URL: <https://www.huseierne.no/hus-bolig/tema/okonomi/slik-kan-du-enkelt-spare-strom-12-tips/> (sjekket 12.05.2023).

- [93] Enova. *Pris- og effektstyrt energilagringssystem — Søk om støtte*. nb-NO. Apr. 2023. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/pris--og-effektstyrt-energilagringssystem-for-boliger/> (sjekket 11.05.2023).
- [94] Enova. *Solcelleanlegg — Energitiltak — Solenergi*. nb-NO. Feb. 2022. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/solenergi/solcelleanlegg/> (sjekket 11.05.2023).
- [95] Enova. *Oppgradering av bygningskroppen – Oppgradere huset*. nb-NO. Des. 2016. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/oppgradere-huset/oppgradering-av-bygningskroppen-/> (sjekket 11.05.2023).
- [96] Asbjørn Vinjar og Knut A. Rosvold. *elektrisitetforsyning*. no. Jan. 2023. URL: <http://snl.no/elektrisitetforsyning> (sjekket 10.02.2023).
- [97] Knut A. Rosvold og Lars Olav Askheim. *transmisjonsnettet*. no. Jan. 2023. URL: <http://snl.no/transmisjonsnettet> (sjekket 09.02.2023).
- [98] NVE. *Nett*. no. Okt. 2015. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/nett/> (sjekket 09.02.2023).
- [99] Olje- og energidepartementet. *Strømnettet*. nb. Okt. 2019. URL: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftnett/> (sjekket 10.02.2023).
- [100] Olje- og energidepartementet. *NOU 2022: 6*. no. NOU. Publisher: regjeringen.no. Jun. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2022-6/id2918464/> (sjekket 12.05.2023).
- [101] NVE. *I kraftsystemet handler mye om fysikk*. no. Okt. 2022. URL: <https://www.nve.no/regulering/smyndigheten/slik-fungerer-kraftsystemet/i-kraftsystemet-handler-mye-om-fysikk/> (sjekket 17.02.2023).
- [102] Olje- og energidepartementet. *Kraftmarkedet*. nb. Mai 2022. URL: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftmarkedet/> (sjekket 17.02.2023).
- [103] Olje- og energidepartementet. *Kraftmarkedet og strømpris*. no. Redaksjonellartikkel. Publisher: regjeringen.no. Okt. 2021. URL: <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/stromnettet/kraftmarkedet-og-strompris/id2076000/> (sjekket 17.02.2023).
- [104] Nord Trøndelag Elektrisitetsverk AS. *Hva påvirker strømprisen?* no. Mai 2022. URL: <https://nte.no/blogg/hva-pavirker-stromprisen/> (sjekket 16.05.2023).
- [105] NVE. *Hvordan fungerer kraftmarkedet?* no. Okt. 2022. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/slik-fungerer-kraftsystemet/hvordan-fungerer-kraftmarkedet/> (sjekket 17.02.2023).
- [106] Knut A. Rosvold. *forbruksavgift på elektrisk kraft*. no. Jan. 2023. URL: [http://snl.no/forbruksavgift\\_p%C3%A5\\_elektrisk\\_kraft](http://snl.no/forbruksavgift_p%C3%A5_elektrisk_kraft) (sjekket 17.02.2023).
- [107] Knut A. Rosvold. *Klima- og energifondet*. no. Jan. 2023. URL: [http://snl.no/Klima-\\_og\\_energifondet](http://snl.no/Klima-_og_energifondet) (sjekket 17.02.2023).
- [108] Altinn. *Merverdiavgift*. no. Jul. 2022. URL: <https://www.altinn.no:443/starte-og-drive/skatt-og-avgift/avgift/merverdiavgift/> (sjekket 17.02.2023).
- [109] NVE. *Elsertifikater*. no. Okt. 2022. URL: <https://www.nve.no/energi/virkemidler/elsertifikater/> (sjekket 07.04.2023).
- [110] NVE. *Plusskunder*. no. Jan. 2023. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/regulering/nettvirkosomhet/nettleie/tariffer-for-produksjon/plusskunder/> (sjekket 04.04.2023).
- [111] Olje- og energidepartementet. *Vil etablere ordning for deling av egenprodusert strøm i borettslag og næringsbygg*. no. Pressemelding. Publisher: regjeringen.no. Jul. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/vil-etablere-ordning-for-deling-av-egenprodusert-strom-i-borettslag-og-naringsbygg2/id2922135/> (sjekket 04.04.2023).
- [112] Elhub AS. *Kraftmarkedsåret 2022*. nb-NO. Jan. 2023. URL: <https://elhub.no/nyheter/kraftmarkedsaret-2022/> (sjekket 02.03.2023).
- [113] Bjørnar Araberg Fladen mfl. «Ordning for deling av fornybar kraftproduksjon». no. I: (feb. 2021), s. 43. URL: [https://www.nve.no/media/12625/forslag-til-forskriftsendring-deling-av-produksjon-3666137\\_1\\_1.pdf](https://www.nve.no/media/12625/forslag-til-forskriftsendring-deling-av-produksjon-3666137_1_1.pdf).
- [114] THEMA Consulting Group. *Har vi fleksibilitet nok til å balansere kraftsystemet fram mot 2050?* Jun. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/5f15fcec3143d1bf9cade7da6afe6e/no/sved/vedlegg4.pdf> (sjekket 23.04.2023).



- [115] Torgeir Ericson og Bente Halvorsen. *Hvordan varierer timeforbruket av strøm i ulike sektorer?* Jun. 2008. URL: [https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/oa\\_200806/ericson.pdf](https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/oa_200806/ericson.pdf) (sjekket 27.04.2023).
- [116] Nordic Council of Ministers. *Demand side flexibility in the Nordic electricity market*. en. TemaNord. Nordic Council of Ministers, des. 2017. ISBN: 978-92-893-5239-0. DOI: 10.6027/TN2017-564. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:norden:org:diva-5052> (sjekket 30.04.2023).
- [117] Regjeringen. *Økodesignforordningen - høring om økodesign for bærekraftige produkter*. no. EUEOSArtikkel. Feb. 2023. URL: <https://www.stortinget.no/no/Hva-skjer-pa-Stortinget/EU-EOS-informasjion/EU-EOS-nytt/2023/eueos-nytt---9.-februar-2023/okodesignforordningen---horing-om-okodesign-for-barekraftige-produkter/> (sjekket 25.04.2023).
- [118] NVE. *Ny rapport viser verdien av fleksibilitet fra elektriske varmtvannsberedere i kraftsystemet*. no. Mar. 2021. URL: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/ny-rapport-viser-verdien-av-fleksibilitet-fra-elektriske-varmtvannsberedere-i-kraftsystemet/> (sjekket 23.04.2023).
- [119] Md Rana mfl. «A Review on Peak Load Shaving in Microgrid—Potential Benefits, Challenges, and Future Trend». I: *Energies* 15 (mar. 2022), s. 2278. DOI: 10.3390/en15062278.
- [120] Chainpro Energy. *Hjemmebatteriets rolle i den nye nettleiemodellen*. nb. Okt. 2022. URL: <https://chainpro.no/nyheter/hjemmebatteriets-rolle-i-den-nye-nettleiemodellen> (sjekket 24.04.2023).
- [121] Frida Berglund, James Lam og Kjersti Aarrestad. *Lagringsteknologier for fleksibilitet i energisystemet*. no-nb. Tekn. rapp. 2020-0919, Rev. A. Nov. 2020, s. 108. URL: [https://www.enova.no/download?objectPath=upload\\_images/81C878C79CF3429CA2B6607EB81BAA47.pdf&filename=Lagringsteknologier%20for%20fleksibilitet.pdf](https://www.enova.no/download?objectPath=upload_images/81C878C79CF3429CA2B6607EB81BAA47.pdf&filename=Lagringsteknologier%20for%20fleksibilitet.pdf).
- [122] EASE. *Lithium-Ion Battery Electrochemical Energy Storage*. en. Sep. 2015. URL: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/> (sjekket 30.04.2023).
- [123] Ivar Gunvaldsen, Steinar Mathiesen og Knut A. Rosvold. *batteri*. no. Mar. 2023. URL: <https://snl.no/batteri> (sjekket 19.04.2023).
- [124] Frederico Zenith mfl. «Analyse av alternative driftsformer for ikke-elektrifiserte baner». no. I: *SINTEF Industri og SINTEF Digital - Nye Energiløsninger, Matematikk og Kybernetikk* 2019:00997 (sep. 2019), s. 119. ISSN: 978-82-14-06371-4. URL: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2627911/Final%2bversjon%2b2%2b%25281%2529.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- [125] Ghassan Zubi mfl. «The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives». en. I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89 (jun. 2018), s. 292–308. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300728> (sjekket 30.04.2023).
- [126] Ao Li mfl. «A Review on Lithium-Ion Battery Separators towards Enhanced Safety Performances and Modelling Approaches». I: *Molecules* 26.2 (jan. 2021), s. 478. ISSN: 1420-3049. DOI: 10.3390/molecules26020478. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7831081/> (sjekket 30.04.2023).
- [127] Elise Kjørstad. *Her tar batteriet fyr*. no. Section: teknologi. Apr. 2022. URL: <https://forskning.no/sikkerhet-skipsfart/her-tar-batteriet-fyr/2012072> (sjekket 27.04.2023).
- [128] Arild Kjærnl. *Batterisikkerhet til sjøs*. nb-NO. Sep. 2020. URL: <https://www.nek.no/batterisikkerhet-til-sjos/> (sjekket 27.04.2023).
- [129] UiO. *Elektrokjemi - Institutt for biovitenskap*. no. Nov. 2021. URL: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/e/elektrokjemi.html> (sjekket 27.04.2023).
- [130] Odne Burheim. *ENGINEERING ENERGY STORAGE*. en. Elsevier, 2017. ISBN: 978-0-12-814100-7.
- [131] Ideal Energy. *Peak Shaving with Solar and Energy Storage*. en-US. Section: Technology. Feb. 2019. URL: <https://www.idealenergysolar.com/peak-shaving-solar-storage/> (sjekket 24.04.2023).
- [132] Rasmus Luthander mfl. «Graphical analysis of photovoltaic generation and load matching in buildings: A novel way of studying self-consumption and self-sufficiency». I: *Applied Energy* 250 (2019), s. 748–759. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.058>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919309110>.
- [133] Rasmus Luthander mfl. «Photovoltaic self-consumption in buildings: A review». en. I: *Applied Energy* 142 (mar. 2015), s. 80–94. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.12.028. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914012859> (sjekket 29.04.2023).

- [134] Johannes Weniger, Tjarko Tjaden og Volker Quaschnig. «Sizing of Residential PV Battery Systems». I: *Energy Procedia* 46 (des. 2014), s. 78–87. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.01.160.
- [135] Joakim Widén og Joakim Munkhammar. «Evaluating the benefits of a solar home energy management system: impacts on photovoltaic power production value and grid interaction». I: jun. 2013.
- [136] Eberhard Waffenschmidt. «Dimensioning of Decentralized Photovoltaic Storages with Limited Feed-in Power and their Impact on the Distribution Grid». en. I: *Energy Procedia* 46 (2014), s. 88–97. ISSN: 18766102. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.01.161. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610214001775> (sjekket 15.05.2023).
- [137] Marc Meuris mfl. «Managing PV power injection and storage, enabling a larger direct consumption of renewable energy: A case study for the Belgian electricity system». en. I: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 27.11 (2019). .eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pip.3084>, s. 905–917. ISSN: 1099-159X. DOI: 10.1002/pip.3084. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.3084> (sjekket 15.05.2023).
- [138] Dawid Józwiak mfl. «Smart Island Energy Systems: Case Study of Ballen Marina on Samsø». I: European Commission, sep. 2021, s. 1–6. DOI: 10.1109/SEST50973.2021.9543171. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cebf6444&appId=PPGMS>.
- [139] SSB. *Varmepumper reduserer utgiftene til strømvhengige nordmenn*. nb. 2022. URL: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/artikler/varmepumper-reduserer-utgiftene-til-stromavhengige-nordmenn> (sjekket 01.05.2023).
- [140] NVE. *Varme*. no. Aug. 2022. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/termisk-energi/varme/> (sjekket 01.05.2023).
- [141] EUR-Lex. *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS REPowerEU Plan*. en. Mai 2022. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483> (sjekket 16.04.2023).
- [142] Hilde Kari Nylund. *Energikilder for varmepumper – Varmepumpeforeningen*. no. URL: <https://www.varmepumpeinfo.no/energikilder-for-varmepumper> (sjekket 01.05.2023).
- [143] Norbert Lümmen. «Termodynamikkens 2. lov (kapittel 6)». I: *TERMODYNAMIKK - Kort og godt*. Universitetsforlaget, 2020, s. 271. ISBN: 978-82-15-02769-2.
- [144] Bjørn Austbø. *Termodynamikkens 2. lov - Entropi*. Power-Point. Nov. 2021.
- [145] EUR-Lex. *Commission Delegated Regulation (EU) No 626/2011 of 4 May 2011 supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of air conditioners*. Apr. 2011. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02011R0626-20170307&from=SV> (sjekket 01.05.2023).
- [146] TOSHIBA. *Hva betyr årsvarmefaktor (SCOP)? – Toshiba varmepumper*. no. Section: Spørsmål og svar. URL: <https://www.toshibavarmepumper.no/sporsmal-og-svar/hva-betyr-arsvarmefaktor-scop/> (sjekket 01.05.2023).
- [147] Helmut Ormestad og Bjørn Pedersen. *carnotsyklus*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/carnotsyklus> (sjekket 01.05.2023).
- [148] Huseiernes Landsforbund. *Slik monteres varmepumpen*. no. Nov. 2011. URL: <https://www.huseierne.no/hus-bolig/tema/oppvarming/varmepumpe-slik-monteres-varmepumpen/> (sjekket 02.05.2023).
- [149] G. F. Hundy, A. R. Trott og T. C. Welch. «Chapter 3 - Refrigerants». en. I: *Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps (Fifth Edition)*. Red. av G. F. Hundy, A. R. Trott og T. C. Welch. Butterworth-Heinemann, jan. 2016, s. 41–58. ISBN: 978-0-08-100647-4. DOI: 10.1016/B978-0-08-100647-4.00003-6. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006474000036> (sjekket 02.05.2023).
- [150] Scott Barrett. «Montreal versus Kyoto: International Cooperation and the Global Environment». I: *Global Public Goods: International Cooperation in the 21st Century*. Red. av Inge Kaul, Isabelle Grunberg og Marc

- Stern. Oxford University Press, jul. 1999, s. 0. ISBN: 978-0-19-513052-2. DOI: 10.1093/0195130529.003.0010. URL: <https://doi.org/10.1093/0195130529.003.0010> (sjekket 01.05.2023).
- [151] Jørn Stene og Vidar Havellen. «Varmepumper til oppvarming og kjøling i bygninger». no. I: *Grønn Byggallianse* Tipshefte nr. 7 (2016), s. 20.
- [152] Arnfinn Christensen. *Se hvordan varmepumpa virker*. no. Section: naturvitenskap. Aug. 2006. URL: <https://forskning.no/bakgrunn-energi-fysikk/se-hvordan-varmepumpa-virker/1022294> (sjekket 02.05.2023).
- [153] Ungenergi. *Hvordan fungerer varmepumpen? — UngEnergi*. nb. Sep. 2022. URL: <https://ungenergi.no/miljoteknologi/bygg/varmepumpe/> (sjekket 02.05.2023).
- [154] Knut Hofstad. *solenergi*. no. Jan. 2023. URL: <http://snl.no/solenergi> (sjekket 03.03.2023).
- [155] Multiconsult. *Norsk solkraft 2022 – innenlands og eksport*. Aug. 2022. URL: <https://www.multiconsult.no/assets/220815-markedsrapport-solenergiklyngen-final-.pdf> (sjekket 02.03.2023).
- [156] DNV. *Solar PV powering through to 2030*. en. URL: <https://www.dnv.com/to2030/technology/solar-pv-powering-through-to-2030.html> (sjekket 29.04.2023).
- [157] Statista. *Utility-scaled solar photovoltaics LCOE 2021*. en. 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/506824/weighted-average-lcoe-of-utility-scaled-solar-photovoltaics-worldwide/> (sjekket 18.05.2023).
- [158] BP Statistical Review of World Energy. *Solar PV cumulative capacity*. Aug. 2022. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-cumulative-capacity> (sjekket 20.04.2023).
- [159] Goksin Kavlak, James McNerney og Jessika E. Trancik. «Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules». en. I: *Energy Policy* 123 (des. 2018), s. 700–710. ISSN: 0301-4215. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.08.015. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518305196> (sjekket 20.04.2023).
- [160] U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. *Solar Radiation Basics*. en. URL: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-radiation-basics> (sjekket 29.04.2023).
- [161] Norsk Polarinstitutt. *Albedoeffekten*. nb-NO. URL: <https://www.npolar.no/faktaside/albedo/> (sjekket 29.04.2023).
- [162] Youness El Mghouchi. «Best Combinations of Inputs for ANN-Based Solar Radiation Forecasting in Morocco». en. I: *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 7.1 (jul. 2022), s. 27. ISSN: 2199-4706. DOI: 10.1007/s40866-022-00152-z. URL: <https://doi.org/10.1007/s40866-022-00152-z> (sjekket 29.04.2023).
- [163] Soteris A. Kalogirou. «Chapter two - Environmental Characteristics». en. I: *Solar Energy Engineering*. Red. av Soteris A. Kalogirou. Boston: Academic Press, jan. 2009, s. 49–762. ISBN: 978-0-12-374501-9. DOI: 10.1016/B978-0-12-374501-9.00002-9. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123745019000029> (sjekket 29.04.2023).
- [164] Solcellespesialisten. *Solceller til bolig*. no. URL: <https://www.solcellespesialisten.no/solceller-til-bolig> (sjekket 29.04.2023).
- [165] Knut A. Rosvold. *watt peak*. no. Feb. 2023. URL: [https://snl.no/watt\\_peak](https://snl.no/watt_peak) (sjekket 24.04.2023).
- [166] Oriol Planas. *What Is the Solar Panel Peak Power? Watt Peak Definition*. Mar. 2022. URL: [https://solar-energy.technology/photovoltaics/elements/photovoltaic-panel/peak-power?utm\\_content=cmp=true](https://solar-energy.technology/photovoltaics/elements/photovoltaic-panel/peak-power?utm_content=cmp=true) (sjekket 30.04.2023).
- [167] Soteris A. Kalogirou. «Chapter nine - Photovoltaic Systems». en. I: *Solar Energy Engineering*. Red. av Soteris A. Kalogirou. Boston: Academic Press, jan. 2009, s. 469–519. ISBN: 978-0-12-374501-9. DOI: 10.1016/B978-0-12-374501-9.00009-1. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123745019000091> (sjekket 30.04.2023).
- [168] K.V. Vidyanandan. «An Overview of Factors Affecting the Performance of Solar PV Systems». I: *Energy Scan (A house journal of Corporate Planning, NTPC Ltd.)* 27 (feb. 2017), s. 2–8. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Kv-Vidyanandan/publication/319165448\\_An\\_Overview\\_of\\_Factors\\_Affecting\\_the\\_Performance\\_of\\_Solar\\_PV\\_Systems/links/5996ae170f7e9b91cb10967b/An-Overview-of-Factors-Affecting-the-Performance-of-Solar-PV-Systems.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Kv-Vidyanandan/publication/319165448_An_Overview_of_Factors_Affecting_the_Performance_of_Solar_PV_Systems/links/5996ae170f7e9b91cb10967b/An-Overview-of-Factors-Affecting-the-Performance-of-Solar-PV-Systems.pdf).
- [169] Paul Bjørn Andersen. *halvledere*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/halvledere> (sjekket 11.04.2023).

- [170] UngEnergi. *Solceller* — UngEnergi. nb. Apr. 2023. URL: <https://ungenergi.no/energikilder/solenergi/solceller/> (sjekket 02.05.2023).
- [171] Emin Meral Mehmet og Dinçer Furkan. «A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems». en. I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.5 (jun. 2011). Publisher: Pergamon, s. 2176–2184. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2011.01.010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000256> (sjekket 01.05.2023).
- [172] Jan-Petter Hansen og Jacob Linder. *foton*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/foton> (sjekket 01.05.2023).
- [173] Aud Skaugen og Reidum M. Romundstad. *Veileder - Solcelleanlegg i større boenheter i Oslo*. Tekn. rapp. Ressurs og Miljø AS, feb. 2017, s. 32. URL: <https://static1.squarespace.com/static/597512eb579fb3d3de0207aa/t/5aaef268352f533ca574fa8e/1521414770785/Veileder-solcelleanlegg-borettslag-og-sameier-Oslo-2017.pdf> (sjekket 19.05.2023).
- [174] Dr Simon Philipps mfl. «Photovoltaics Report». en. I: (feb. 2023). URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.
- [175] Bjørn Pedersen. *krystallinsk*. no. Nov. 2021. URL: <https://snl.no/krystallinsk> (sjekket 01.05.2023).
- [176] L. El Chaar, L. A. lamont og N. El Zein. «Review of photovoltaic technologies». en. I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.5 (jun. 2011), s. 2165–2175. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2011.01.004. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000050> (sjekket 01.05.2023).
- [177] Store norske leksikon. *ingot*. no. Apr. 2019. URL: <https://snl.no/ingot> (sjekket 01.05.2023).
- [178] Ricardo A. Marques Lameirinhas, João Paulo N. Torres og João P. de Melo Cunha. «A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications». en. I: *Energies* 15.5 (jan. 2022). Number: 5 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, s. 1823. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15051823. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/5/1823> (sjekket 03.03.2023).
- [179] Lars Mæhlum og Knut A. Rosvold. *solceller*. no. Jan. 2023. URL: <http://snl.no/solceller> (sjekket 03.03.2023).
- [180] Mohammad Reza Maghami mfl. «Power loss due to soiling on solar panel: A review». en. I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (jun. 2016), s. 1307–1316. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.044. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000745> (sjekket 30.04.2023).
- [181] PV\*SOL help. *Options :: PV\*SOL® help*. URL: <https://help.valentin-software.com/pvsol/en/options/> (sjekket 30.04.2023).
- [182] Shafqat Mughal, Yog Sood og R. Jarial. *A Review on Solar Photovoltaic Technology and Future Trends*. Apr. 2018. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Shafqat-Mughal/publication/324922616\\_A\\_Review\\_on\\_Solar\\_Photovoltaic\\_Technology\\_and\\_Future\\_Trends/links/5aeb435faca2727bc003ca8d/A-Review-on-Solar-Photovoltaic-Technology-and-Future-Trends.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Shafqat-Mughal/publication/324922616_A_Review_on_Solar_Photovoltaic_Technology_and_Future_Trends/links/5aeb435faca2727bc003ca8d/A-Review-on-Solar-Photovoltaic-Technology-and-Future-Trends.pdf).
- [183] Swapnil Dubey, Jatin Narotam Sarvaiya og Bharath Seshadri. «Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review». en. I: *Energy Procedia*. PV Asia Pacific Conference 2012 33 (jan. 2013), s. 311–321. ISSN: 1876-6102. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.072. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213000829> (sjekket 30.04.2023).
- [184] International Energy Agency og International Solar Alliance (ISA). *Solar Energy: Mapping the Road Ahead*. Okt. 2019. URL: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/7de8652c-47b0-474e-8642-cbf20245b1f6/Solar\\_Energy\\_Mapping\\_the\\_road\\_ahead.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/7de8652c-47b0-474e-8642-cbf20245b1f6/Solar_Energy_Mapping_the_road_ahead.pdf).
- [185] Bjørn Thorud. «Hva er det med distribuert solenergi?» I: *Praktisk økonomi & finans* 32.3 (des. 2016). Publisher: Universitetsforlaget, s. 297–313. ISSN: 1501-0074. DOI: 10.18261/issn.1504-2871-2016-03-09. URL: <https://www.idunn.no/doi/10.18261/issn.1504-2871-2016-03-09> (sjekket 02.03.2023).
- [186] MN Hamid. *Inverter solceller - vekselretter til solcelleanlegg*. nb-NO. Mar. 2023. URL: <https://www.otov.no/blog/solcellepanel-solceller/vekselretter-slik-fungerer-det/> (sjekket 30.04.2023).
- [187] Google. *Brøsetvegen 155*. Jul. 2017. URL: <https://earth.google.com/web/search/Br%c3%b8setvegen+155/@63.41163947,10.44045347,118.793944a,121.52169475d,35y,-135.15816706h,20.00848658t,0r/data=CnsaURJLCiUweDQ2NmQzMWwNhNjM3MGI2ZTtk6MHgOYjEyMmYxZWZlZDk2MWEzGeS36GSptE9AIbyZLEn54CRAK>

- hBCcs04c2V0dmVnZW4gMTU1GAEgASImCiQJt0xm6s7LTUAR87M5m96nTUAZHh1PRQSuIUahrR7HgPNgIEA (sjekket 19.05.2023).
- [188] Standard Norge. *Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient - Beregningsmetoder (ISO 6946:2017)*. Jan. 2017. URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=941536> (sjekket 18.05.2023).
- [189] Byggmakker. *Etterisolering av vegger og tak*. no. Mar. 2022. URL: <https://www.byggmakker.no/rad-og-guider/vegg/etterisolering-av-vegger-og-tak> (sjekket 18.05.2023).
- [190] Hans Boye Skogstad og SINTEF Byggforsk. «med luftet kledning og totrinnstetning». no. I: (des. 2012). URL: <https://www.byggforsk.no/file/index/544>.
- [191] NORGIPS. *Produktdatablad GU X 9mm*. Mar. 2017. URL: <https://cdn.byggjeneste.no/nobb/06fa32e5-f63b-43d9-adfb-5b713537d2c7> (sjekket 21.05.2023).
- [192] Kommunal og arbeidsdepartementet. *Veiledning til byggeforskrift 1985*. Feb. 1985. URL: [https://www.regjeringen.no/contentassets/20503ddfe0664fac9e2185c1a6c80716/veiledning\\_feb1985\\_til\\_byggeforskr\\_1985.pdf](https://www.regjeringen.no/contentassets/20503ddfe0664fac9e2185c1a6c80716/veiledning_feb1985_til_byggeforskr_1985.pdf) (sjekket 21.05.2023).
- [193] Statkraft. *Trondheim fjernvarme*. no. URL: <https://www.statkraft.com/om-statkraft/hvor-vi-har-virksomhet/norge/trondheim-fjernvarme/> (sjekket 24.04.2023).
- [194] kommuner og OSM Kartverket Geovekst. *ArcGIS Web Application*. URL: <https://statkrafteu.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=4f17d9af01884fc1b98708105a227dc3> (sjekket 19.04.2023).
- [195] Tom Heine Nätt og Knut Sæbjørnsen. *MATLAB*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/MATLAB> (sjekket 07.05.2023).
- [196] Pöyry Management Consulting AS. *Evaluering av modeller for klimajustering av energibruk*. 2014. URL: [https://publikasjoner.nve.no/rapport/2014/rapport2014\\_07.pdf](https://publikasjoner.nve.no/rapport/2014/rapport2014_07.pdf) (sjekket 03.05.2023).
- [197] TOSHIBA. *Multisplitt Polar*. no. URL: <https://www.toshibavarmepumper.no/kundeservice/multisplitt-polar3/> (sjekket 21.05.2023).
- [198] TOSHIBA. *Dokumentasjon for energietikett Toshiba Multisplitt Polar*. Feb. 2022. URL: <https://www.toshibavarmepumper.no/siteassets/dokumenter/datablad/dokumentasjon-for-energietikett-toshiba-multisplitt-polar>.
- [199] TOSHIBA. *Inverter Multi System R32 Outdoor Unit (4 rooms) RAS-4M27U2AVG-E*. Apr. 2018.
- [200] Metereologisk institutt. *Observasjoner og værstatistikk*. 2022. URL: <https://seklima.met.no/observasjoner/> (sjekket 06.03.2023).
- [201] Valentin Software GmbH. *PV\*SOL – Take your solar installations to the next level of efficiency*. en. URL: <https://pvsol.software> (sjekket 11.05.2023).
- [202] NVE. *Hvor kommer strømmen fra?* no. Apr. 2023. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/kr aftproduksjon/hvor-kommer-stroemmen-fra/> (sjekket 07.05.2023).
- [203] Ragni Fjellgaard Mikalsen mfl. «EBOB – Solcelleinstallasjoner på bygg. Brannspredning og sikkerhet for brannvesen.» no. I: RISE Rapport: 2022:82 (sep. 2022). ISSN: 978-91-89711-22-8. URL: <https://risefr.no/media/rapporter/rise-rapport-2022-82-solcelleinstallasjoner-pa-bygg-hovedrapport.pdf>.
- [204] Solcellespesialisten. *Longi 400W full black Half-Cell - Solcellespesialisten AS*. URL: <https://www.nettbutikk.solcellespesialisten.no/helsort/lr5-54hpb-400m-p/longi-400w-full-black-half-cell> (sjekket 02.05.2023).
- [205] Longi. *LR5-54HPB 390-410M*. URL: [https://www.nettbutikk.solcellespesialisten.no/media/multicase/documents/lr5-54hpb\\_390-410wp.pdf](https://www.nettbutikk.solcellespesialisten.no/media/multicase/documents/lr5-54hpb_390-410wp.pdf).
- [206] Chiltern Solar Ltd. *PV Installation Guide — Chiltern Solar*. URL: <https://chilternsolar.co.uk/pv-installation-guide/> (sjekket 02.05.2023).
- [207] Solcellespesialisten. *Midtklemme G3 30-50mm - Solcellespesialisten AS*. URL: <https://www.nettbutikk.solcellespesialisten.no/s%C3%B8lv/6700400125-variant/midtklemme-g3-30-50mm> (sjekket 02.05.2023).
- [208] Knut M Finstad. *Om oss i Strømkilden.no*. nb. URL: <https://stromkilden.no/pages/om-oss> (sjekket 21.05.2023).
- [209] strøm kilden.no. *BMZ ESS 7.0/9.0/X*. nb. URL: <https://stromkilden.no/products/bmz-ess> (sjekket 21.05.2023).

- [210] Solcellespesialisten. *Vekselrettere - Solcellespesialisten AS*. URL: [https://www.nettbutikk.solcellespesialisten.no/produkter/vekselrettere?Filter=PrdGruppeLev3ID%C2%A41:PrdGruppeLev3ID%C2%A41\\_44%7CPrdGruppeLev2ID%C2%A41:PrdGruppeLev2ID%C2%A41\\_61](https://www.nettbutikk.solcellespesialisten.no/produkter/vekselrettere?Filter=PrdGruppeLev3ID%C2%A41:PrdGruppeLev3ID%C2%A41_44%7CPrdGruppeLev2ID%C2%A41:PrdGruppeLev2ID%C2%A41_61) (sjekket 09.05.2023).
- [211] PearEnergy. *XOLTA BAT-79 OUTDOORS*. da-DK. URL: <https://pearenergy.dk/vare/xolta-bat-79-outdoors/> (sjekket 18.05.2023).
- [212] TOSHIBA. *Varmepumpe luft til luft — Toshiba Multisplitt Shorai — Toshiba var...* no. URL: <https://www.toshibavarmepumper.no/varmepumper-luft-luft/toshiba-multisplitt-polar/> (sjekket 12.05.2023).

## A Vedlegg: Varmepumpeberegning i MATLAB

```
close all; clear; clc
```

### Importere temperatur fil

```
tu = readtable('Temperatur_Voll_2022.csv', 'delimiter', ';');
tu = tu.Lufttemperatur;
tu = replace(tu, ',', '.');
tu = char(tu);
tu = str2num(tu);
tu = tu(1:8760,1); % [°C]
```

### Gjennomsnittets temperatur og romoppvarmingsandel

```
tu_snitt=gjsnitt(tu); % Bruker funksjonen som finner døgnetts snitttemperatur med temperaturfilen
gj_time= repelem(tu_snitt,24); % Repeterer snitttemperaturen for hver dag i døgnetts 24 timer
gj_sn_temp_time=reshape(gj_time,[],1); % Omgjøring fra 1*8760 til 8760*1

Rom_oppv_faktor= [];

for i = 1:length(gj_sn_temp_time)
    if gj_sn_temp_time(i) >= 17 % Returnerer en romoppvarmingsandel på 0, dager hvor gj.snitt temperatur er
        Rom_oppv_faktor(i) = 0; % større eller lik 17°C
    else
        Rom_oppv_faktor(i) = 0.67; % Returnerer en romoppvarmingsandel på 0,67, dager med gj.snitt temperatur
    end % under 17°C
end

Rom_oppv_faktor=reshape(Rom_oppv_faktor,[],1); % gir en vektor med romoppvarmingsandel for hver time
```

### Copfaktorer

```
COPtemp=[-15,-7,2,7,12]; % [°C]
COP_datablad= [2.8,3.31,4.40,5.56,7.03]; % verdier fra Toshiba Multisplitt Polar med 2 innedeler

% Lineær interpolasjon
COP = interp1(COPtemp, COP_datablad, tu, 'linear','extrap'); % Gir hver time en egen COP verdi
SCOP= (sum(COP))/8760 % Årsvarmefaktor

SCOP = 5.6667
```

### Forbruk

```
Forbruk= readmatrix('timesforbruk_alle.csv'); % Henter csv-fil med oppgitt energiforbruk
Forbruk= Forbruk(:,1:7); % [kWh] Gir en kolonne per bygg
Forbruk_pr_oppgang= Forbruk/2; % Deler forbruket på to siden det er 2 utedeler pr
% bygning, 1 utedel må dekke 4 leiligheter (en oppgang)

Totalt_strom= sum(Forbruk,"omitnan"); % [kWh/år] Totalt årsforbruk for hver bolig

Q_H=Rom_oppv_faktor.*Forbruk_pr_oppgang; % [kW] Strømforbruket for romoppvarming
W_inn=Q_H./COP; % [kW] Nødvendig tilført effekt for at varmepumpa dekker
% oppgitt forbruk
```

### Tilført effekt

```
PI_temp= [-15,-10,-5,0,6,10,15]; % [°C] For Toshiba Polar Multisplitt
PI_datablad=[1.59,1.67,1.75,1.83,1.93,1.99,2.07]; % [kW] Varmepumpens tilførte effekt

PI = interp1(PI_temp, PI_datablad, tu, 'linear','extrap'); % Gir hver time i året en tilført effekt

W_el_vp = []; % Tilført energi til varmepumpa
W_el_overforbruk = []; % Energibehov som må dekkes av annen energikilde enn varmepumpe

for i = 1:size(PI, 1)
    for j = 1:size(W_inn, 2)
        if PI(i) >= W_inn(i,j) % Sammenligner varmepumpens tilførte effekt (PI) med nødvendig
            W_el_vp(i,j) = W_inn(i,j); % tilført effekt (W_inn)
            W_el_overforbruk(i,j) = 0;
        else
            W_el_vp(i,j) = PI(i); % Returnerer differansen mellom nødvendig og oppgitt tilført
            W_el_overforbruk(i,j) = W_inn(i,j) - PI(i); % effekt som er oppvarmingsbehovet som må dekkes av en annen
        end % varmekilde enn varmepumpa
    end
end

Overforbruk= sum(W_el_overforbruk,"omitnan") % [kWh] Sum av forbruket (W_el) som overskrider den tilførte
% effekten (PI)

overforbruk = 1x7
    17.9725    14.3813    57.6105    46.4556    51.5212    16.7356    43.9803
```

### Totalt forbruk med varmepumpe

```
Tot_forbruk_vp= W_el_vp + ((1-RomOppv_faktor).*Forbruk_prOppgang)+ W_el_Overforbruk; % Sum av forbruket til varmepumpa,
% forbruket som ikke er romoppvarming og
% forbruket som må dekkes av annen kilde
Tot_forbruk_vp_bygg= 2*Tot_forbruk_vp; % Multiplisert med to (antall utedeler pr bolig)
% for å få forbruket for hver bolig
Tot_forbruk_vp_bolig= sum(Tot_forbruk_vp_bygg, "omitnan") % [kWh/år] Årsforbruket til hver av boligene med
% varmepumpe

Tot_forbruk_vp_bolig = 1×7
104 ×
    2.9209    2.8650    3.8525    3.2952    3.3168    2.6730    2.9574
```

```
Totalt_forbruk_Karinelund= sum(Tot_forbruk_vp_bygg, 'all', "omitnan") % [kWh/år] Årsforbruket til Karinelund med
% varmepumper

Totalt_forbruk_Karinelund = 2.1881e+05
```

```
Besparelse= Totalt_strom-Tot_forbruk_vp_bolig % [kWh] Energibesparelsen etter installasjon av
% varmepumpe

Besparelse = 1×7
104 ×
    3.1704    3.1158    4.1909    3.5960    3.6159    2.9049    3.2198
```

```
Prosent_besparelse= ((Totalt_strom-Tot_forbruk_vp_bolig)./Totalt_strom)*100
```

```
Prosent_besparelse = 1×7
    52.0484    52.0965    52.1037    52.1823    52.1577    52.0791    52.1245
```

```
writematrix(Tot_forbruk_vp_bygg, 'forbruk_vp.xlsx'); % Skriver det beregnede forbruket inn i ny excel-fil
```

### Funksjon for å finne gjennomsnittstemperatur

```
function y = gjsnitt(tu)

n=floor(length(tu)/24);
y=zeros(1,n);
for i=1:n
    y(i)=sum(tu(24*i-23:24*i))/24;
end
end
```



