

Aamo, Hanna
Nilsen, Trym Cohen
Slotvik, Ulvida Arntzen

Energisystemer på Transittkaia i utviklingen mot et nullutslippsområde

Analyse av faktorer for effektiv energiutnyttelse gjennom solcellepanel og energilagring

Bacheloroppgave i Fornybar Energi
Veileder: Jacob J. Lamb
Mai 2024

Aamo, Hanna
Nilsen, Trym Cohen
Slotvik, Ulvida Arntzen

Energisystemer på Transittkaia i utviklingen mot et nullutslippsområde

Analyse av faktorer for effektiv energiutnyttelse
gjennom solcellepanel og energilagring

Bacheloroppgave i Fornybar Energi
Veileder: Jacob J. Lamb
Mai 2024

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



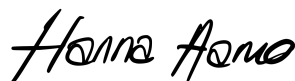
Kunnskap for en bedre verden

Bacheloroppgave


Oppgavens tittel: Energisystemer på Transittkaia i utviklingen mot et nullutslippsområde Project title (ENG): Energy systems at Transittkaia in the development towards a zero emission neighbourhood	Gitt dato: 11.01.2024
	Innleveringsdato: 22.05.2024
	Antall sider rapport / sider vedlagt: 87 / 6
Gruppedeltakere: Hanna Aamo hanna.aamo@gmail.com Trym Cohen Nilsen trym.cohen.nilsen@icloud.com Ulvida Arntzen Slotvik ulvida-a-s@hotmail.com	Prosjektnummer: BIFOREN24-2
	Veileder: Jacob J. Lamb

Fritt tilgjengelig: Tilgjengelig etter avtale med oppdragsgiver:

Rapporten frigitt etter:

Gruppedeltakernes signatur:





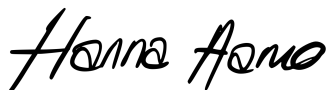
Forord

Bacheloroppgaven er skrevet som en avsluttende oppgave for ingeniørutdanningen på Fornybar Energi ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Emnet FENT2900 - Bacheloroppgave i Fornybar energi er et avsluttende emne som skal tilsvare en studiebelastning på 20 studiepoeng.

Prosjektgruppen består av Hanna Aamo, Trym Cohen Nilsen og Ulvida Arntzen Slotvik som alle har retning innen effektiv energibruk. Hensikten med denne oppgaven har vært å sammenfatte og anvende kunnskap som har blitt opparbeidet i løpet av studiet i tillegg til å tilegne seg ny kunnskap for å kunne besvare valgt problemstilling.

Gruppen ønsker å benytte muligheten til å rette en stor takk til vår interne veileder Jacob J. Lamb for hans engasjement, veiledning og tilgjengelighet gjennom hele prosjektets varighet. I tillegg vil gruppen takke bærekraftsrådgiver for Nyhavna Utvikling Brian Hurup-Felby, daglig leder Erik Erlien og plansjef Birgitte Kahrs for deling av data og informasjon om plan og utvikling på Nyhavna. Gruppen vil også takke Hans Martin Mathisen for omvisning på ZEB lab.

Trondheim, 22.05.2024



Hanna Aamo



Trym Cohen Nilsen



Ulvida Arntzen Slotvik

Sammendrag

Trondheim kommune står ovenfor høye ambisjonsnivåer for å bli klimanøytral innen 2030. Transittkaia som del av et nullutslippsområde representerer et bærekraftig samfunn som er i tråd med Norges og verdens klimamål. En vellykket grønn omstilling er avhengig av effektivt samarbeid og økt bevissthet for klimaavtrykket vi etterlater oss. Energibruk i bygninger har potensiale til å reduseres med strengere krav, økt bevissthet hos forbruker samt mer lokal og fornybar energiproduksjon.

Lavutslippsamfunn er i stor fremvekst og begreper som ZEB og ZEN har fått større oppmerksomhet. Nyhavna er et delområde i Trondheim som skal utvikle seg til å bli et nullutslippsområde, der Transittkaia er første delområdet ut. Nyhavna har en forventet fordeling 60/40 på bolig og næring, et totalt areal for nye og bevarte bygg på 340 000 m², samt 5 200 beboere. Denne oppgaven analyserer Transittkaia som del av det fremtidige nullutslippsområdet på Nyhavna, og antas å utgjøre 25 % av dette området. Avgjørende faktorer for optimal utnyttelse av energisystemer på Transittkaia er nødvendig på veien mot et nullutslippsområde. For å avgrense oppgaven har analysen tatt for seg energiberegninger av det elektriske behovet til integrerte energisystemer, som solcellepanel og batterilagring. Energibehov for analysen ble mottatt fra bærekrafts rådgiver for Nyhavna Utvikling.

Gjennom litteraturstudie rundt kapasitet, miljø og sikkerhet ble det gjennomført analyse av monokrystallinsk solcellepanel, og energilagring. Tidlig vurdering av solpotensialet, allerede i prosjekteringsfasen er nødvendig for å oppnå best mulig utnyttelse. Solpanel på både tak og fasader som effektivt utnyttes vil resultere i overskuddsenergi. Energilagring gjennom litium-ion batteri vil kunne utnytte fordeler rundt energilagring, som energi-arbitrasje og lokal lastforskyvning. Det er derimot utfordringer knyttet til kostnader og miljøpåvirkninger som også må tas i betraktning. Kostnadene for batterier og solcellepanel forventes å synke i takt med økt etterspørsel. Kombinasjon av tiltak og smarte styringssystemer, vil være avgjørende faktorer for å optimalisere det totale energisystemet.

Bærekraftig samfunnsutvikling avhenger av at lovverk og krav oppdateres i takt med teknologisk utvikling. Gjennom smarte komponenter og gjennomtenkte løsninger vil fleksibiliteten øke, og forbruket kan styres mer effektivt. Støtteordninger og tilpassede delingsløsninger av overskuddsproduksjon vil fremme en mer aktiv deltagelse i det grønne skiftet. Tettere klimapartnerskap, samarbeid om utvikling og innovative løsninger vil bidra til redusert forbruk og smartere verdikjeder. Transittkaia representerer et spennende prosjekt mot et bærekraftig nullutslippsområde, som er avhengig av helhetlig tilnærming, samarbeid og innovasjon for å oppnå målsetningene.

Abstract

Trondheim is ambitiously striving to become climate-neutral by 2030. Transittkaia, as part of a zero-emission area, represents a sustainable society aligned with Norway's and global climate goals. A successful green transition depends on efficient collaboration and increased awareness of the climate footprint we leave behind. Energy use in buildings has the potential to be reduced through stricter requirements, increased consumer awareness and more local and renewable energy production.

Low-emission communities are becoming increasingly common, with concepts like Zero Emission Buildings (ZEB) and Zero Emission Neighbourhoods (ZEN) attracting significant attention. Nyhavna is an area in Trondheim set to develop into a zero-emissions area, with Transittkaia being the first sub-area. Nyhavna is expected to have a ratio of 60/40 for residential and commercial purposes, with a total area for new and preserved buildings of 340,000 m², and 5,200 residents. This thesis analyzes Transittkaia as part of the future zero-emission area at Nyhavna and is assumed to make up 25 % of this area. Critical factors for optimal utilization of energy systems at Transittkaia are necessary to achieve ZEN-status. To define the task, the analysis has been limited to energy calculations of the electrical demand for energy systems, such as solar panels and battery storage. Energy requirements for the analysis were obtained from the sustainability advisor at *Nyhavna Utvikling*.

Through a literature review regarding capacity, environment and safety, an analysis of monocrystalline solar panels and energy storage was conducted. Early assessment of the solar potential is necessary to achieve optimal utilization. Solar panels on both roofs and facades, that are efficiently utilized will result in surplus energy. Energy storage through lithium-ion batteries could exploit advantages around energy storage, such as energy arbitrage and local load shifting. However, there are challenges related to costs and environmental impacts that must also be considered. Combination of energy initiatives and smart management will be decisive factors for optimizing the overall energy system.

Sustainable social development depends on legislation and requirements being updated in line with technological advancements. Through smart components and thoughtful solutions, flexibility will increase, and consumption will be more effectively managed. Support schemes and customized sharing solutions for surplus production will promote a more active participation in the green transition. Closer climate partnerships, collaboration on development, as well as innovative solutions will contribute to reduced consumption and smarter value chains. Transittkaia represents an exciting project towards a sustainable zero-emission area, dependent on a comprehensive approach, collaboration and innovation to achieve its objectives.

Begrepsliste

AC	Vekselstrøm
Arbeidsmedium	Væske/Gass som brukes i kjølesykluser og varmepumper for å overføre varme til en termisk syklus.
BESS	Battery Energy Storage System
BRA	Bruksareal
BTA	Bruttoareal
COP	Effektfaktor for varmepumpe (Coefficient of performance)
DC	Likestrøm
EPD	Environmental Product Declaration
KPI	Key Performance Indicator, nøkkellindikatorer.
LCA	Life Cycle Analysis
LCC	Life Cycle Cost
TSO	Transmisjon System Operatør
ZEB	Zero Emission Building, bygning med null utslipp over sin livsløpsperiode
ZEN	Zero Emission Neighbourhood, område med null utslipp over sin livsløpsperiode

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Begrepsliste	iv
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Hensikt og problemstilling	1
1.3 Avgrensninger	2
1.4 Disposisjon	2
2 Teori	3
2.1 Miljøkrav	3
2.1.1 Bærekraftsmål	3
2.1.2 Nasjonale miljøkrav	5
2.2 Norges kraftsituasjon	5
2.2.1 Eksisterende kraftnett	7
2.2.2 Kraftsituasjon de neste 10 årene	8
2.2.3 Smart Grid	9
2.3 Energieffektivitet, krav for bygninger og standarder i Norge	9
2.3.1 Byggeteknisk forskrift	9
2.3.2 Energibruk i bygninger	10
2.3.3 PROFet	11
2.3.4 Energieffektivisering	12
2.3.5 Energieffektive bygninger	14
2.3.6 Teknologisk utvikling	17
2.3.7 Nullutslippsnabolag	18
2.4 Solproduksjon	20
2.4.1 Solcelle	20
2.4.2 Ulike typer solcellepanel	21
2.4.3 Optimalisere solenergi	22
2.5 Energilagring	25

2.5.1	Litium-ion batteri	26
2.5.2	Egenskaper for batterilagringssystemer	29
2.5.3	Fordeler med energilagring	30
2.5.4	Styringsalgoritmer	31
2.5.5	Langtidslagring	32
2.6	Varmepumper	33
2.7	Termisk energilagring	35
2.7.1	Akkumulatortank	35
2.7.2	Fjernvarme og fjernkjøling	35
2.7.3	Sesongvarmelager	36
2.7.4	Faseendringmateriale	37
2.8	Miljøpåvirkning	37
2.9	Nyhavna - utviklingen mot en nullutslippsbydel	38
2.9.1	Transittkaia - første delområde ut	41
2.9.2	Sjøvarmepumpe og fjernvarmenett	41
2.9.3	Sesongvarmelager	42
2.10	Lignende energisystem	42
2.11	Klima i Trondheim	43
3	Metode	45
3.1	Referansesystem	45
3.2	Antagelser	46
3.3	Datainnhenting og programvare	46
3.3.1	Solinnstråling	47
3.3.2	Valg av batteri	47
3.4	Energiberegninger	48
3.4.1	Energibehov	48
3.4.2	Solproduksjon	48
3.4.3	Utnyttelse av batteri	49
4	Resultater	51
4.1	Energibehov	51
4.1.1	Elektrisk energibehov	51
4.1.2	Termisk energibehov	53
4.1.3	Totalt energibehov	54

4.2	Solinnstråling	55
4.2.1	Sammenligning av ukentlig solinnstråling	56
4.3	Solproduksjon og elektrisitetsbehov	59
4.3.1	Sommeruker med ulik mengde solinnstråling	59
4.3.2	Vinteruker med ulik mengde solinnstråling	60
4.4	Utnyttelse av batteri	61
4.4.1	Energiflyt kombinert med energilagring i sommeruke	62
4.4.2	Energiflyt kombinert med energilagring i vinteruke	64
4.4.3	State of Charge	66
5	Diskusjon	68
5.1	Usikkerheter i prosjektet	74
5.2	Videre arbeid	74
6	Konklusjon	76
	Referanser	78
A	Modelleringsverktøyet PROFet	I
B	ZEN kategorier, vurderingskriterier og KPI	II
C	Lagringsteknologier med kategorisert egnethet	III
D	Batterispesifikasjoner for valgt batteripakke	IV
E	Områdeoversikt over Transittkaia	V
F	State of Charge for det simulerte året	VI

Figurer

2.1	Bærekraftsmål nummer 7, 9, 11, 12 og 13	3
2.2	Spotpris for 2021, 2022 og 2023 i NO3	6
2.3	Inndeling av kraftnettet, med tilhørende spenningsnivåer	7
2.4	Prognose for regional energibalanse i Norge	7
2.5	Utredningen til PROFet som beregner lastprofilmodeller til bygg	11
2.6	Passive tiltak på bygninger fra solinnstråling	15
2.7	Illustrasjon av seks ambisjonsnivåer for ZEB	16
2.8	Tre ulike faktorer som påvirker transformasjoner i samfunnet	18
2.9	Illustrasjon av et snitt av en silisium-solcelle	21
2.10	Illustrasjon av et lysfoton som frigjør et elektron	21
2.11	Monokrystallinsk solcellepanel	22
2.12	Multikrystallinsk solcellepanel	22
2.13	Tynnfilm solcellepanel	22
2.14	Illustrasjon av oppsett fra enkeltstående solcelle til matrise	22
2.15	Oversikt over ulike vinkler knyttet til et solcellepanel	24
2.16	Kategorisering av ulike teknologier for energilagring	25
2.17	Illustrasjon av hovedelementene i et litium-ion batteri	27
2.18	Illustrasjon av ulike egenskaper for utvalgte katodematerialer i LIB	28
2.19	Batteriets oppbygging fra celle til system	29
2.20	Fordeler med batteribasert energilagring	31
2.21	Styringsalgoritmer for optimalisert drift i bygg	32
2.22	Varighet og nominell effekt for ulike lagringsteknologier	33
2.23	Oppbygging av hovedkomponenter i en varmpumpe	34
2.24	Oversiktsbilde over Nyhavna i Trondheim	39
2.25	Energisystem planlagt på Nyhavna etter konseptutredningen	40
2.26	Temperaturmålinger fra værstasjon ved Lade i Trondheim	43
3.1	Tredimensjonal arkitektskisse over Transittkaia	45
4.1	Elektrisk energibehov	52
4.2	Elektrisitetsbehov hver uke	52
4.3	Termisk energibehov	53
4.4	Termisk behov hver uke	54
4.5	Totalt energibehov på Transittkaia	55
4.6	Solinnstråling fra 2005 til 2020	55
4.7	Solens vinkel over Transittkaia og høyden på horisonten	56
4.8	Solinnstråling i 2019 og i 2020, samt utklipp fra sommer og vinter	57

4.9	Solinnstrålingsdata fra alle fasader, pergola og tak på ZEB-laboratoriet	58
4.10	Ukentlig energiflyt for et helt år	59
4.11	Energiflyt for to sommeruker	60
4.12	Energiflyt for to vinteruker	61
4.13	Energiflyt kombinert med batteriflyt og SoC i uke 25	63
4.14	Energiflyt kombinert med batteriflyt og SoC i uke 29	64
4.15	Energiflyt kombinert med batteriflyt og SoC i uke 52	65
4.16	Energiflyt kombinert med batteriflyt og SoC i uke 9	66
4.17	Batteriets SoC	67

Tabeller

2.1	Energibehov til boligblokk og næringsbygg	12
2.2	Oversikt over ulike typer litium-ion batterier	27
2.3	Batteri spesifikasjon for en batteripakke	29
2.4	Anslått bruksareal for Transittkaia	41
4.1	Batteri spesifikasjoner for parallellkobling	61
4.2	Energiflyt for uke 25	63
4.3	Energiflyt for uke 29	64
4.4	Energiflyt for uke 52	65
4.5	Energiflyt for uke 9	66

1 Innledning

Denne delen beskriver bakgrunn og presenterer problemstillingen for denne oppgaven. Avgrensninger redegjøres samt en kort beskrivelse av oppgavens struktur.

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Trondheim kommune har som mål at Trøndelag skal bli klimanøytrale innen 2030. Fylket skal deriblant kutte klimagassutslippene med 50 - 55 %, redusere klimafotavtrykket og samtidig være klimarobuste. For å sikre at målene oppnås, er det videre delt opp i delmål. Disse delmålene omhandler nye miljø- og klimavennlige teknologier og løsninger. Samtidig er det et økende fokus på å forbedre sirkulær økonomi og ressursproduktivitet [1].

I dag står bygninger for omtrent 40 % av klimagassutslippene i Norge. Fremtiden vil bære preg av strengere krav til bygninger og det vil være viktig å få ned utslippene og energibruken knyttet til byggenes verdikjede. Det vil utgjøre store forskjeller dersom mennesker bor på nullutslippsområder, samt at det bygges nye bygg med fokus på lite klimautslipp under byggeprosessen. Kompleksiteten øker betraktelig når det skal reduseres utslipp for et område sammenlignet med en enkelt bygning. Utvikling av nullutslippsbygninger er en vesentlig forløper mot å utvikle nullutslippsområder og vil bidra til fremvekst av lavutslippsamfunnet. Det grønne skiftet er avhengig av å implementere en større andel fornybare energikilder som kan benyttes for å dekke energibehov. Det blir stadig viktigere med egenproduksjon av energi i fremtiden for å opprettholde forsyningssikkerheten til det norske kraftmarkedet. EU estimerer at det vil være mye lokal energiproduksjon i fremtiden, og nærmere bestemt forventes det at halvparten av husholdningene vil produsere egen fornybar energi innen 2030 [2, 3].

1.2 Hensikt og problemstilling

Høyt energiforbruk tilknyttet bygninger og behovet for energieffektive tiltak for å nå verdens klimamål, har bidratt til å utarbeide problemstillingen for denne oppgaven. Utviklingen av Nyhavna er et svært interessant prosjekt som bidrar i veien mot lavutslippsamfunn. Hensikten med denne oppgaven er å analysere og vurdere hvordan integrering av solcellepaneler og batteribasert energilagring kan støtte Transittkaia i å nå målene for nullutslipp, som en del av Nyhavnas utvikling mot et lavutslippsamfunn. Oppgaven vil fokusere på det elektriske energibehovet for området, samt utforske tilleggsaspekter som energieffektivisering og fleksibilitet i energibruken. Denne oppgaven skal analysere og diskutere rundt problemstillingen:

Hvilke faktorer er avgjørende for å optimalisere utnyttelsen av energisystemer på Transittkaia i utviklingen mot et nullutslippsområde?

1.3 Avgrensninger

Bacheloroppgaven er utarbeidet av gruppen i samråd med intern veileder, og begrensninger for oppgaven er gjort med grunnlag i tid og omfang. Ettersom oppgaven ikke er etterspurt av ekstern veileder har innhenting av nødvendig data vært utfordrende, som har medført et større behov for antagelser. Nyhavna Utvikling har bidratt med data for energibehov som benyttes i denne oppgaven. Oppgaven begrenses til å analysere energiltak for å dekke det elektriske energibehovet for Transittkaia – et potensielt nullutslippsområde. Transittkaia er et delområde på Nyhavna som videre antas å være 25 % av hele Nyhavna. Det er ikke tatt hensyn til verken økonomisk lønnsomhet eller energiltak for å dekke det termiske energibehovet på Transittkaia. Dette er noe som må undersøkes, dersom det skulle bli aktuelt å videreføre denne oppgaven.

1.4 Disposisjon

Oppgaven er inndelt i seks hoveddeler med nummererte kapitler, hvor kapittel 1 utgjør innledningen. De påfølgende kapitlene er listet opp og grovt forklart nedenfor:

- 2 Teori: Dette kapitlet er utarbeidet basert på en grundig litteraturstudie og innhenting av relevant teori. Delen har til hensikt å gi nødvendig innsikt i krav og tiltak for energieffektive bygninger. I tillegg er det underkapittel for muligheter til produksjon og lagring av energi. Til slutt i denne delen presenteres relevant teori for Transittkaia som er satt som referansesystem for dette prosjektet.
- 3 Metode: Denne delen presenterer fremgangsmåte og beregninger gjort i prosjektet. Antagelser som er benyttet for prosjektet og de ulike beregningene er presentert her.
- 4 Resultater: Resultatene som fremkommer er fra beregninger og programmering gjort i *Python*.
- 5 Diskusjon: Dette kapitlet diskuterer rundt resultatene og eventuelle forbedringer. Feilkilder redegjøres.
- 6 Konklusjon: Den avsluttende delen svarer på problemstillingen og belyser muligheter for videre arbeid.

2 Teori

Dette kapittelet går nærmere inn på relevant teori, begreper og formler som benyttes i denne oppgaven. I første del presenteres bærekraftsmål, miljøkrav og kraftsituasjonen i Norge. Deretter redegjøres det for krav og standarder for energieffektive bygninger i Norge, samt energieffektive løsninger, energiproduksjon og energilagring. Som siste del presenteres Transittkaia som referansesystem for denne oppgaven. Dette er et delområde som ligger på Nyhavna i Trondheim som skal utvikles til å bli en nullutslippsbydel.

2.1 Miljøkrav

Som en konsekvens av økt klimagassutslipp er verden inne i en global klimakrise. Endring i klima øker gjennomsnittstemperaturen og påvirker kraftproduksjonen. Som et tiltak for å begrense klimaendringene ble Parisavtalen vedtatt i 2015 og nasjonale tiltak ble iverksatt [4, 5].

2.1.1 Bærekraftsmål

De forente nasjoner (FN) har opprettet internasjonale bærekraftsmål som skal stanse klimaendringer innen år 2030 for at fremtidige generasjoner skal ha like muligheter. FNs bærekraftsmål er delt inn i 17 mål, derav 169 mindre delmål som skal bidra til at verden har globale retningslinjer å forholde seg til. Bærekraftsmålene er laget med innspill fra hele verden og har som formål å forbedre forholdene relatert til fattigdom, ulikhet og klimaendringer. Figur 2.1 viser bærekraftsmål nummer 7 - *Ren energi til alle*, 9 - *Industri, innovasjon og infrastruktur*, 11 - *Bærekraftige byer og lokalsamfunn*, 12 - *Ansvarlig forbruk og produksjon* og 13 - *Stoppe klimaendringene* [6].



Figur 2.1: Bærekraftsmål nummer 7, 9, 11, 12 og 13 som er relevant for denne oppgaven [6].

FNs bærekraftsmål skal som nevnt gjelde for hele verden og har stor innflytelse for norsk politikk i kommuner og lokalsamfunn. Selv om flere bærekraftsmål allerede er oppfylt i Norge, er det fortsatt mye som gjenstår og kan forbedres. Nyhavna Utvikling har lagt 4 prinsipper i bunn for å bidra til å nå bærekraftsmålene, deriblant å måle og evaluere bærekraftstiltakene, åpenhet

knyttet til bærekraftsarbeidet, krav til samarbeidspartnere og leverandører og at alle lover og forskrifter blir fulgt. Bærekraftsmålene og tilhørende relevante delmål for Transittkaia og denne oppgaven er listet opp under [7, 6].

7 Ren energi til alle:

7.1. Innen 2030 sikre allmenn tilgang til pålitelige og moderne energitjenester til en overkommelig pris.

7.2. Innen 2030 øke andelen fornybar energi i verdens samlede energiforbruk betydelig

9 Industri, innovasjon og infrastruktur:

9.4. Innen 2030 oppgradere infrastruktur og omstille næringslivet til å bli mer bærekraftig, med en mer effektiv bruk av ressurser og større anvendelse av rene og miljøvennlige teknologiformer og industriprosesser, der alle land gjør en innsats etter egen evne og kapasitet.

11 Bærekraftige byer og lokalsamfunn:

11.3. Innen 2030 oppnå en mer inkluderende og bærekraftig urbanisering med mulighet for en integrert og bærekraftig bosettingsplanlegging og -forvaltning som gir medbestemmelse i alle land.

12 Ansvarlig forbruk og produksjon:

12.2. Innen 2030 oppnå bærekraftig forvaltning og effektiv bruk av naturressurser

12.5. Innen 2030 redusere avfallsmengden betydelig gjennom forebygging, reduksjon, materialgjenvinning og ombruk

13 Stoppe klimaendringene:

13.2. Innarbeide tiltak mot klimaendringer i politikk, strategier og planlegging på nasjonalt nivå

13.3. Styrke enkeltpersoners og institusjoners evne til å motvirke, tilpasse seg og redusere konsekvensene av klimaendringer og deres evne til tidlig varsling, samt styrke kunnskapen og bevisstgjøringen om dette

FN bærekraftsmål må ses i sammenheng med Parisavtalen med mål om å redusere klimagassutslipp innen 2030 og unngå en global oppvarming over 1,5 °C. Avtalen tilsier at hvert land har forpliktelser i kutt av klimagassutslipp og at hvert land må ha en egen nasjonal plan [4].

2.1.2 Nasjonale miljøkrav

Norge har i alt 24 mål for klima og miljø, hvor seks mål er direkte rettet mot klima. Disse målene tilsier blant annet at Norge gjennom Parisavtalen har forpliktet seg til å redusere klimagassutslipp med minst 55 % innen 2030 i forhold til referanseåret 1990. Videre er det mål om at Norge skal være klimanøytral fra 2030 og et lavutslippssamfunn i 2050. Behovet for klimatilpasning er stort og nasjonalt legges det derfor vekt på kunnskapsdeling og kapasitetsbygging. Den årlige rapporten fra Miljødirektoratet som omhandler oppdateringer om tiltak, barrierer og mulige virkemidler for klima refererer til at Norge kan være på god vei mot et lavutslippssamfunn i 2035. Denne rapporten ble publisert april 2024 og refererer til unødvendig høyt forbruk av energi i boliger. For å redusere boligens strømutfgifter nevnes det tiltak som å installere fornybare energikilder samt vedlikehold og etterisolering av eksisterende boliger. Det blir også referert til ressursdeling av fritidsbebyggelse for å unngå at bygg står tomme og reduksjon i utslipp som følge av mindre material- og arealbruk. Varmepumper eller elektriske vedovner trekkes frem som gode tiltak for utslippsreduert oppvarming [8].

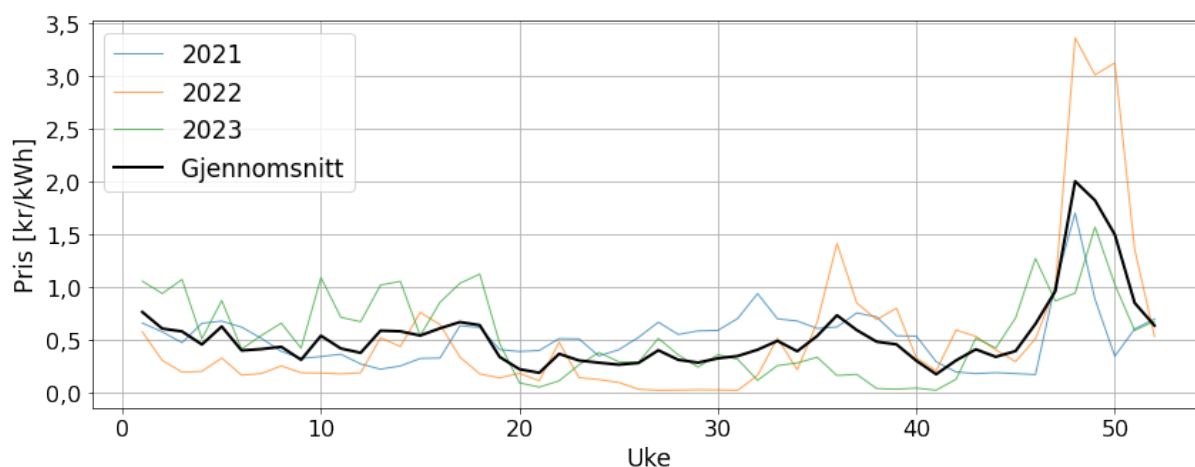
Trondheim kommune utga en rapport i 2024 som omhandler fastsatte klimaløfter for Trondheim kommune. Det første klimaløftet handler om at Trondheim skal være klimanøytral og kutte sin del av klimafotavtrykket. Dette innebærer at direkte klimagassutslippene skal kuttes ned med 80 % innen 2030, samt øke andelen naturlig karbonopptak, karbonfangst og lagring. Det andre klimaløftet fastslår at Trondheim skal implementere en energismart tilnærming, som innebærer effektiv utnyttelse av fornybare energikilder og eliminering av alle fossile energikilder. Dette krever innovativ og fleksibel energibruk, sikring av stabil og pålitelig tilgang til energi, samt gjennomtenkt arealbruk for ytterligere fornybare energikilder. Det tredje klimaløftet fastsetter at Trondheim skal utvikle seg mot en sirkulær økonomi for å bevare ressurser og fremme en sirkulær bystruktur. Dette inkluderer å ta vare på de ressursene som allerede eksisterer, fremme sirkulære og delte løsninger, samt håndtere klimavennlig avfallshåndtering. Det fjerde klimaløftet adresserer behovet for å gjøre Trondheim mer klimarobust. Dette kan oppnås ved å sikre at byen og naturområder er tilpasset klimaendringer og har tilstrekkelig beredskap for eventuelle ekstremvær [9].

2.2 Norges kraftsituasjon

Oppmerksomheten rundt kraftsituasjonen i Norge har de siste årene medført stor interesse etter at strømprisene hadde et kraftig prishopp i 2021. Dette skyldes flere faktorer som dyrere klimakvoter, perioder med lite vind i Europa, lite vann i magasinene, samt økte gass- og kullpriser som en konsekvens av blant annet Russlands innovasjon av Ukraina. Norges kraftmix baseres i hovedsak på fornybar kraftproduksjon. Selv om egenprodusert energi i Norge i liten

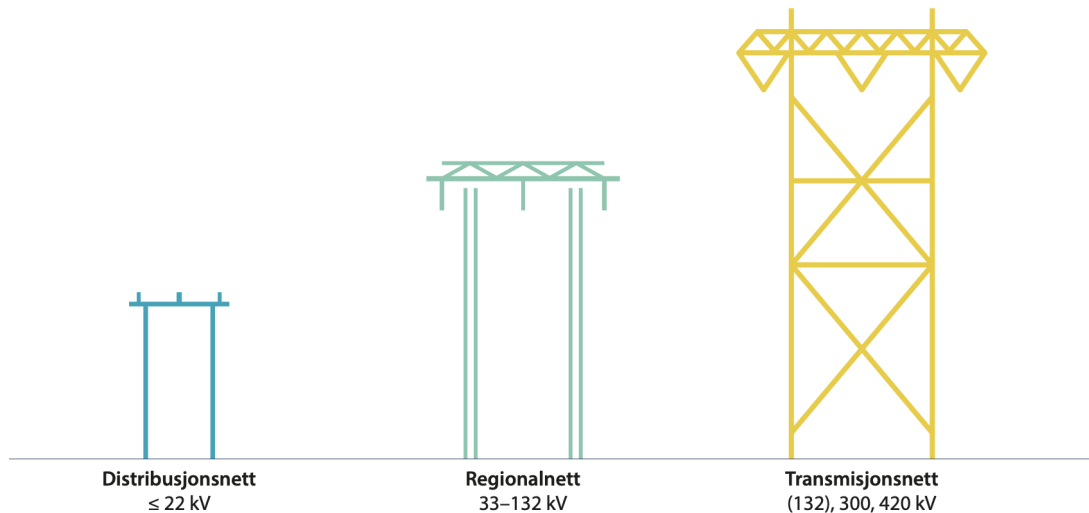
grad blir påvirket av fossile avgifter, er vi koblet til Europa med utenlandskabler. Disse skal i utgangspunktet bidra til reduserte strømutgifter i vintermånedene. Likevel har strømprisen i Norge økt da kraftunderskuddet har krevd mer importert energi fra et kostbart kraftmarked i Europa [10].

Figur 2.2 illustrerer spotprisen for strømområdet i Midt-Norge (NO3) i henholdsvis 2021, 2022 og 2023. Data fra tidligere år utelates da strømprisen har økt betraktelig, spesielt i vintermånedene de siste årene. Strømprisene forventes å stabilisere seg, men vil i følge NVE sin langsiktige kraftmarkedsanalyse holde seg på et høyt nivå frem mot 2030, før det forventes å avta og nærme seg det historiske nivået mot 2040 [11].



Figur 2.2: Ukentlig gjennomsnittlig spotpris for 2021, 2022 og 2023 i NO3 [12].

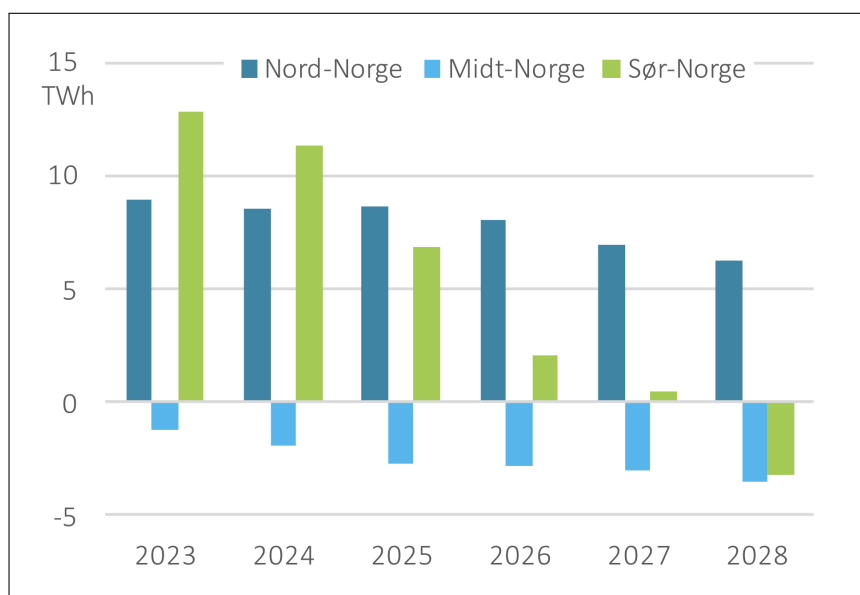
Under Olje- og energidirektoratet er det Statnett som har det overordnede systemansvaret for energibalansen i Norge. De er transmisjonsoperatør (TSO) og har dermed ansvaret for det nasjonale transmisjonsnett, samt utvekslingsforbindelsene med andre land. Figur 2.3 illustrerer inndelingen av ulike nettnivå, med tilhørende spenning. Under transmisjonsnett ligger regionalnett. Her har Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) utpekt utredningsansvarlig nettselskap til totalt 17 regioner. I både Nord- og Sør-Trøndelag er det Tensio som har dette ansvaret. I tillegg til kravene om leveringsplikt og krav til kvalitet medfølger krav om kraftsystem-utredninger (KSU). KSU-rapportene krever at ansvarlig nettselskap samler inn og koordinerer informasjon fra nettanlegg. Det samler informasjon om både produksjon, forbruk og forventet endringer i kraftsystemet. Overgangen til et lavutslippsamfunn gir et økt press på strømmettet. Flere sektorer skal elektrifiseres, energibehovet øker, samtidig som også mer produksjon implementeres i kraftnettet [13, 14].



Figur 2.3: Inndeling av kraftnettet, med tilhørende spenningsnivåer [13].

2.2.1 Eksisterende kraftnett

Norge har historisk hatt en større energiproduksjon enn forbruk i normalår. Høy grad av elektrifisering i husholdninger, samt et stadig økende forbruk i industrien, bidrar til høyere belastning på alle tre nettnivå. Både Statnett og Tensio – som sammen har det totale ansvaret for nettet i Trondheim, har utgitt flere rapporter som belyser nødvendige nettforsterkninger, samt behovet for økt kraftproduksjon. Statnett utgir en kortsiktig markedsanalyse hvert år som gir oversikt over kraftsystemet, samt kraftmarkedet sin forventet utvikling de neste 5 årene. Figur 2.4 viser dagens energibalanse i henholdsvis Nord-, Midt- og Sør-Norge. Her illustreres blant annet Midt-Norges svake kraftunderskudd, sammen med dens forventede reduksjon [15, 16, 17, 18].



Figur 2.4: Prognose for regional energibalanse i Norge [18].

Videre har Statnett også utarbeidet *Områdeplan Midt* (Trøndelag, Romsdal og Nordmøre), som presiserer behovet for økt kapasitet i transmisjon-, samt regionalnettet. Frem mot år 2030 har Statnett anslått et behov på 60 - 100 millioner NOK for investeringer i transmisjonsnettet. Kraftnettet må dimensjoneres etter maksimalt effektbehov som medfører store kostnader ved økt behov. Fra konseptvalgutredning i 2021 (KVU Stor-Trondheim) ble kapasitetsbegrensninger for energiforsyning til Trondheim kartlagt. For å møte begrensningene inkluderer dette å utvikle nettet med 420 kV og 132 kV som spenningsnivå på enkelte strekninger. Denne utviklingen omfatter flere nye transformatorstasjoner, samt oppgradering av enkelte nett-strekninger. Den overordede planen inkluderer også Tensio sine mer lokale planer, som fremkommer i prosjektporteføljen i KSU-rapporten. Målet er å fjerne flaskehals og muliggjøre det fremtidige forbruksbehovet som i dag blir hindret av kapasitetsbegrensninger [17, 19, 20].

2.2.2 Kraftsituasjon de neste 10 årene

Ulike rapporter, fra ulike instanser, organisasjoner og direktorater – peker alle på at det er et økende energibehov, selv med økt energieffektivisering. I tillegg forventes det økt fornybar kraft, både i Norge og Europa, og kostnadene knyttet til utbygging vil fortsette å synke. Statkraft peker på at både solkraft, vindkraft og batterier vil bli betraktelig rimeligere, men at også norsk kraftbalanse får større begrensninger mot 2030, som også illustreres i Figur 2.4. Likevel påpeker Statkraft at den nordiske kraftbalansen er positiv i hele perioden, for samtlige scenarier. Derfor vil import av energi både være mulig og avgjørende for norsk forsyningssikkerhet [21].

Variasjoner i fornybar teknologi vil spille en sentral rolle i fremtidens energisystem. Statkraft peker på hvor komplementær solkraft og vindkraft er sammen. På sommerhalvåret er det stort potensial for solkraft, mens historisk data viser at det blåser mer på vinteren. I Trøndelag alene står vindkraft for i overkant av 44 % av den installerte effekten. Den samme rapporten peker også på en høy samtidighetsfaktor i vind, på tvers av Norges fylker og naboland. Det betyr at før solkraft får stort nok avtrykk, vil Midt-Norge - som allerede er i kraftunderskudd, være avhengig av import og vannkraft i perioder hvor vindproduksjonen avtar. Trondheim har ifølge Tensios KSU-rapport fra 2022; *ingen begrensninger på kapasitet for tilknytning av ny kraftproduksjon*, når det gjelder mindre kraftverk. Det betyr at variabel kraftproduksjon, som solproduksjon, kan ha stort potensial i og rundt Trondheim. I Trøndelag er også 23 % av den installerte effekten vannkraft med høy reguleringsevne. Ved å implementere mer variabel energiproduksjon, samt øke effektiviteten til den regulerbare produksjonen, vil Trøndelag – som allerede er et område med stort kraftunderskudd, bidra til at Norges vannkraft-fleksibilitet blir desto mer verdifull [21, 15, 22, 19].

Etter 2030 er det forventet at den norske kraftbalansen blir ytterligere styrket. Regjeringen

og Energidepartementet satt i 2022 høye ambisjonsnivåer for særlig havvind, med ambisjoner om å kunne tildele områder til nærmere 30 GW havvindproduksjon. Denne kraftproduksjonen vil tilsvare dagens installerte effekt fra vannkraft. NVE's langsiktige kraftanalyse forventer en produksjonskapasitet på 6,2 GW mellom 2030 og 2040, basert på regjeringens ambisjoner. Merk at denne antagelsen fra regjeringen og Energidepartementet kun inkluderer igangsatt produksjon og ikke tildelt kapasitet. Samme rapport antar en jevn økning i produksjonskapasitet fra solkraft de neste 15 årene [23, 11].

2.2.3 Smart Grid

Samfunnet utvikler seg raskt og for å kunne håndtere et fullelektrifisert samfunn må kraftnettet utvikle seg i samme tempo. Smart Grid er en betegnelse for fremtidens løsning av et digitalisert, smart strømnett. Elektrifiseringen av samfunnet krever et fleksibelt, pålitelig og robust strømnett [24].

Smart Grid bruker to-veis kommunikasjon, måle- og styringssystemer og innovative sensortechnologier. Ny teknologi med Smart Grid bidrar til at feil blir lettere å forutsi og håndtere, strømforbruket blir effektivisert og kapasiteten til kraftsystemet blir ytterligere forbedret. I forhold til dagens kraftnett muliggjør Smart Grid reduserte kostnader i forbindelse med vedlikehold samt legger til rette for økt forbruk av fornybare energikilder. Ved et eventuelt strømbrudd vil teknologier i et Smart Grid kunne detektere og isolere bruddene før problemet sprer seg videre i strømnettet. Lokal energiproduksjon vil i tillegg kunne bidra til å gjøre et område fleksibelt med selvforsynt energi. Prosessering av store mengder data, personvern tilknyttet dette og digitale styringssystemer gjør at cyberangrep er en reell trussel med et intelligent strømnett. Dagens konflikter og politiske problemer gjør at det er viktig å være oppmerksom på disse risikoene [24, 25, 26].

2.3 Energieffektivitet, krav for bygninger og standarder i Norge

I lys av klimamålene har det vært en økende oppmerksomhet rettet mot energieffektive bygninger. Som følge av dette har krav og standarder for bygninger blitt skjerpet og det har blitt introdusert flere begreper som definerer ulike ambisjonsnivåer. Energieffektivitet i bygninger og tilhørende tiltak har fått økt oppmerksomhet.

2.3.1 Byggteknisk forskrift

Teknisk forskrift til plan- og bygningsloven fra 2017 (TEK-17) er en forskrift som inneholder krav og standarder. Disse kravene må følges i forbindelse med prosjektering, planlegging og gjennomføring av byggverk i Norge. Hensikten med en slik forskrift er å sikre at byggverk

oppfyller minimumskrav i forhold til sikkerhet, helse, miljø, utforming og bærekraft. Forskriften er juridisk bindende for alle parter involvert, deriblant byggherrer, arkitekter, ingeniører, entreprenører og tilsynsmyndigheter [27].

Kapitlene 14, 15 og 17 i forskriften stiller krav til energieffektivitet, energibehov og klimaregnskap fra bygningsdeler. Kapittel 14 i TEK-17 omhandler krav til energieffektivitet og løsninger for energiforsyning. De generelle kravene sier at det skal tilrettelegges for forsvarlig energibruk og at kravene gjelder oppvarmet bruksarealet. Dersom bygningen er underlagt vern for bevaring av kulturminner eller tilsvarende skal kravene følges så langt det lar seg gjøre. Kapittel 15 omhandler generelle krav til varme- og kjølebehandlinger, sentralvarmeinstallasjon, samt varmepumpe- og kuldeinstallasjon. De generelle kravene skal ivareta innemiljø og sikkerhet, tilrettelegge for regulering og være tilpasset energiøkonomisk drift. I henhold til TEK-17 er det forbudt å installere varmeinstallasjoner som benytter fossil brensel. Kapittel 17 i forskriften omhandler klimagassregnskap fra ulike materialer. Det skal ved hver hovedombygging av boligblokker og yrkesbygninger bli laget et klimagassregnskap som baserer seg på metoden som blir brukt i Norsk Standard (NS), NS 3720:2018 [27, 28].

Miljødirektoratets rapport for 2024 trekker frem anbefaling om å endre byggteknisk forskrift. Fra personlig kommunikasjon med en sjefsingeniør i Direktoratet for byggkvalitet (DiBK), kan nye forskriftkrav forventes å bli tilgjengelige i 2025. DiBK er per april 2024 i oppstartsfasen for å utarbeide krav rundt energibruk, hvor det spesifikke oppdraget lyder som følger [8, 29]:

DiBK skal utrede mulige endringer i byggteknisk forskrift og byggesaks-forskriften som kan legge til rette for økt energieffektivisering, energifleksibilitet og lokal energiproduksjon.

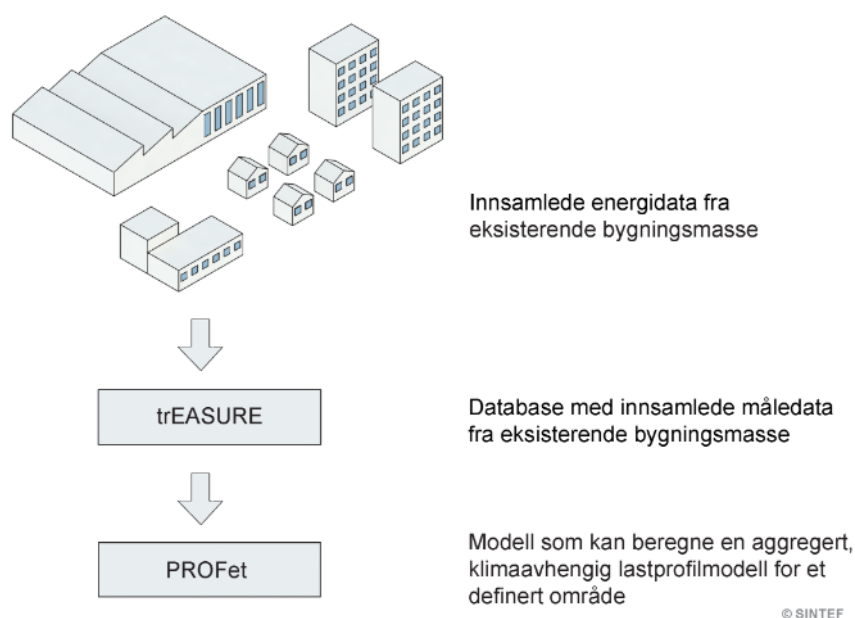
2.3.2 Energibruk i bygninger

Energibruk i bygninger står i dag for omtrent 40 % av Norges energibruk, hvor boligbygg står for den største andelen. Det er stort potensiale for reduksjon av energibruk i allerede eksisterende bygninger, og kravene for boliger blir strengere i takt med miljøkravene som skal nås. Renovering av bygninger er svært kostbart og tidkrevende. Det vil i større grad lønne seg å inkludere energieffektive tiltak fra start i planlegging av nye bygg. ZEN-rapport nummer 50 påpeker at dette vil gi store fremtidige besparelser. Energimerking av boliger ble et krav i 2010 og har blitt et viktig begrep for både salg og kjøp av boliger. Energidepartementet vedtok 1. mars 2024 endringer i energimerkeforskriften for boliger. Endringene omfatter hvilke bygg som må ha energiattest, innholdet i selve attesten, samt et offentlig sammendrag. Videre omfatter endringene bruk av attesten i markedsføring, samt prosessen av en energivurdering og hvilke

type bygninger som er underlagt kravet om energivurdering [14, 30, 31].

2.3.3 PROFet

For å kunne planlegge og dimensjonere nye bygninger er det en fordel å kunne anslå en lastprofilmodell for bygget. PROFet er et verktøy som genererer lastprofiler for energibehov gjennom en kombinert og klimaavhengig lastprofilmodell. Beregningsmodellen estimerer lastprofiler og topplast for et bebygd område og tar hensyn til blant annet graden av energieffektivisering, samt faktorer som brukeratferd og oppvarmingsvaner. Måldata som benyttes i dette verktøyet er basert på data for energibruk fra over 300 bygninger og tar utgangspunkt i krav fra TEK for ulike tidsperioder. Figur 2.5 illustrerer hvordan SINTEF har arbeidet for å kunne utvikle beregningsmodellen PROFet [32].



Figur 2.5: Utredningen til PROFet som beregner lastprofilmodeller til bygg i et gitt bebygd område [32].

Tabell 2.1 illustrerer energibehovet til romoppvarming, tappevann, og el-spesifikt forbruk i henholdsvis en boligblokk og et næringsbygg. Bygningskategoriene er delt inn i ulike energinivå fra *Regular minus* (R-) til *Veldig effektiv*. *Regular*-nivået tilsvarer energinivået for gjennomsnittlige bygninger, bygget før 2010. *Regular pluss* (R+) er bygg som har lavere energibehov enn gjennomsnittet, men fortsatt ikke når energinivået til *Effektiv*, som forøvrig tilsvarer TEK17 standard. *Veldig effektiv* tilsvarer omtrent passivhus-standard. Tabell 2.1 viser store variasjoner i forbruket til romoppvarming for de ulike energinivåene til bygningskategoriene, mens tappevann og el-spesifikt forbruk jevnt i de forskjellige energinivåene. Vedlegg A illustrerer en lastprofilmodell for en *Regular* enebolig i Oslo, basert på utetemperaturen for et gitt referanseår. Denne modellen illustrerer mye av det samme som Tabell 2.1. Konstant tappevann

og el-spesifikt forbruk, mens romoppvarming varierer mye i takt med utetemperaturen [14].

Tabell 2.1: Energibehov til boligblokk og næringsbygg, oppgitt i kWh/m² BRA [14].

Bygningskategori	Nivå	Rom oppvarming	Tappevann	El. spesifikt	Total
Boligblokk	R-	147	40	40	227
	R+	109	40	40	189
	Effektiv	68	40	40	148
	Veldig eff.	51	40	40	131
Næringsbygg	R-	130	20	137	287
	R+	96	20	137	253
	Effektiv	57	20	137	214
	Veldig eff.	36	20	122	178

2.3.4 Energieffektivisering

I Norge står oppvarmingsbehovet for mellom 50 - 70 % av det totale energibehovet. Komfort preferanser og lokal utetemperatur fører til store variasjoner i spesifikk oppvarming. Det er mange tiltak som kan redusere energibruken, noen er enkle og rimelige mens andre tiltak er dyrere og krever mer planlegging. Ved å investere i energibesparende og effektive tiltak vil både energiforbruket og kostnadene reduseres. Energieffektivisering innebærer tiltak som reduserer energibehovet og sikrer at dette behovet dekkes av fornybar energi. Tiltak som kan gi betydelig reduksjon i energiforbruk er bedre isolasjon, varmepumpe, gjenvinning av varmtvann, tilkobling til fjernvarmeanlegg og smart styring for lys, varme og ventilasjon. Energiltak har ulik forventet levetid. For at energiltak som implementeres skal kunne optimaliseres og være i drift så lenge det er tiltenkt, er det viktig at forbrukere vedlikeholder systemet for å opprettholde forventet ytelse og levetid [14, 30].

Energiltak i husholdninger bidrar til økt fleksibilitet i energibruk og muliggjør frigjøring av elektrisitet. Fleksibilitet i energisystemer er nødvendig for å kunne håndtere utfordringene som følger av økningen i forbruk, samt variasjoner i væravhengig kraftproduksjon. Muligheten til å regulere forbruk og produksjon etter behov vil bidra til å avlaste kraftnettet og kunne redusere strømregningen. Begreper som ofte brukes i sammenheng med fleksibilitet er topplastreduksjon (peak shaving) og lastforskyvning (load shifting). I tillegg vil energi-arbitrasje – å utnytte prisforskjellene i kraftmarkedet, bidra til økt fleksibilitet. Dette innebærer fleksibelt forbruk (demand response) og fokuserer på å bruke elektrisitet når produksjonen er stor og prisen er lav, og slik involvere flytting av strømforbruket eller lastreduksjon. Ved å kunne flytte forbruk i tid, redusere eller stanse forbruket i perioder vil kraftsystemet kunne utjevne effekttoppene og skape et mer stabilt system [33, 34].

Avansert måle- og styringssystemer (AMS) måler strømforbruket og gir forbrukere mer detaljert

oversikt og samtidig øker bevisstheten rundt forbruk. Fra 2019 ble det et nasjonalt krav med AMS hos alle strømkunder. Ved bruk av smarte styringssystem gjennom elektriske enheter og sensorer, deriblant et varmestyringssystem og energieffektiv belysning, vil det være mulig å tidsstyre varmen og belysningen i boligen. Med dette tiltaket får brukeren bedre kontroll på energiforbruket og kan i tillegg tilpasses til bruk av elektriske komponenter [35, 26].

Lading av elbiler er et eksempel på forbruk som har stort potensiale for fleksibilitet. Standard lading innebærer at kjøretøyet tilføres energi når det kobles til laderen og avsluttes når laderen tas ut eller batteriet er fulladet. Tidsstyrt lading muliggjør lading på predefinerte tidspunkter, mens smart lading muliggjør lading på respons av ytre signaler. Slike konsepter for lading inngår under enveis lading. Med et økende antall plusskunder øker markedet for vehicle-to-grid (V2G). Denne toveis lademuligheten åpner for å kunne benytte overskuddsstrøm til lading og kunne levere strøm tilbake til strømmettet. V2G vil også være et konsept som kan fungere som forsyningssikkerhet hvis hovedforsyningen til bygg eller installasjoner skulle svikte. Ulempene med V2G er at bilbatteriet får redusert levetid grunnet ekstra ladesykluser, samt at det krever store variasjoner i kraftmarkedet for å være lønnsomt som mellomlager [36, 33].

Enovatilskuddet er en støtteordning for investering i teknologier som bidrar til omstillingen mot et lavutslippssamfunn. Enova sin årsrapport for 2023, belyser økt etterspørsel av energitiltak for boliger, mye på grunn av høye strømpriser og lav utetemperatur. Tiltak som nevnes av Enova er blant annet investering i varmepumpe, solceller, superisolerte vinduer og dører, samt varmestyringssystemer. Tiltakene med økonomisk støtte varierer i utvalg og pris etter hvor ny teknologien er og størrelsen på markedet. Enova utbetalte rekordmange tilskudd til oppgradering i 2023 og det var en sterkt økning i omsetning av solcellepanel samme året. Tilskuddene *Smart varmtvannsbereder* og *pris- og effektstyrte systemer* som kom på markedet i 2022 har hatt stor prosentvis økning. Forbrukernes valg og preferanser påvirker lavutslippssamfunnet og klimagassutslippene. Den offentlige støtten for elektriske biler har belyst at forbrukere kan ta viktige valg for elektrifiseringen av samfunnet som også bør prioriteres for energieffektiverende tiltak. Økende bevissthet gjennom ressurser og grønn omstilling er en økende trend både nasjonalt og globalt [20].

Husholdninger og forbrukere har stort potensiale til å øke fleksibiliteten og frigi mer elektrisitet. Strømbruken i husholdninger sank fra 40 TWh i 2021 til omtrent 35 TWh i 2022. Dette forbruket påvirkes derimot mye av årlige variasjoner i utetemperaturen. Høye strømpriser fører til nedgang i strømforbruket knyttet til elektrisk oppvarming og øker ved-forbruket til oppvarming. Mange av byggene som står i dag vil også eksistere i 2050. Etterspørselen for energitiltak har økt for eksisterende boliger og det medfølger store klimagevinster i å oppgradere eldre bygg. Rive og bygge ny bolig sammenlignet med å oppgradere en bolig er tilsvarende halve klimafotavtrykket.

Varmepumper satte i tillegg ny rekord i omsetning både i 2021 og 2022, med ytterligere forventet vekst i årene som følger. Produksjon av nye boliger ble redusert i 2023 og fokuset på rehabilitering og ombygging har holdt seg stabil. Det er en betydelig del av indirekte klimagassutslipp knyttet til materialer i bygninger. For å redusere utslippene må nye byggematerialer med lavt klimafotavtrykk tas i bruk, eksisterende bygningsmasse må i større grad gjenbrukes og det bør rettes større oppmerksomhet mot ombruk, resirkulering og forlenging av levetid for materialer. Den 1. juli 2023 ble det vedtatt endringer i TEK-17 som omhandler ombruk, som skal gjøre gjenbruk enklere og mer utbredt [20, 37, 38, 39, 40, 14].

2.3.5 Energieffektive bygninger

Som en del av utviklingen mot reduserte klimagassutslipp for bygninger er det blitt definert begreper med ulike ambisjonsnivåer. Blant disse er passivhus, nullutslippshus og plusshus ulike begreper for bygninger med ulike krav til energibruk og klimagassutslipp [41].

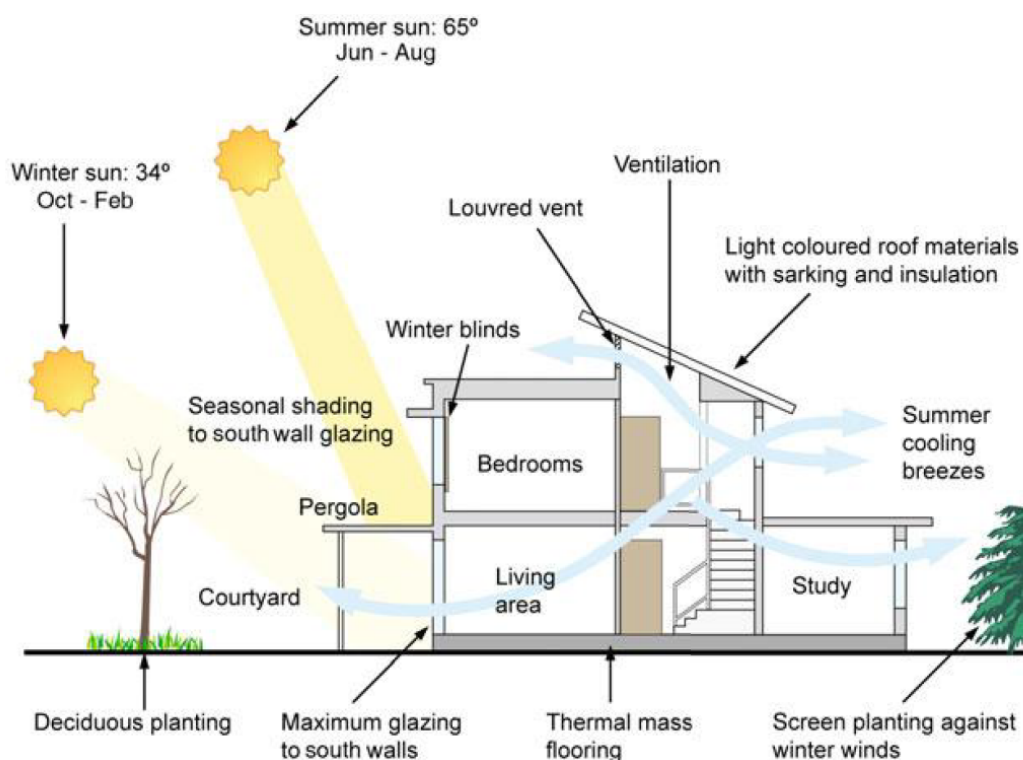
Passivhus

Et passivhus er en bygning som har mye lavere energiforbruk enn en konvensjonell bolig. Det lave energiforbruket skyldes passive tiltak som god isolasjon, i tillegg til tette komponenter med god kvalitet som reduserer luftlekkasjer. Det gjelder både yttervegger, vinduer og dører. Gjennom passive tiltak vil et passivhus oppnå godt inneklimate med god ventilasjon. Norge har en egen standard for energikrav til passivhus, NS 3700. Denne standarden omfatter krav til varmetapstall, oppvarmingsbehov, energiforsyning, bygningsdeler, komponenter og energitiltak. For å kunne imøtekomme energieffektive løsninger i et passivhus stilles det et minstekrav til U-verdi for vinduer og dører, minstekrav for kuldebroverdier, varmegjenvinning i ventilasjon og lekkasjetall [42].

Standarden tar hensyn til at klima og størrelse på huset avgjør behovet for oppvarming. For en bolig større en 250 m^2 vil det i følge standarden ikke være nødvendig å bruke mer enn 15 kWh/m^2 til oppvarming. En stadig teknologisk utvikling vil kunne forbedre u-verdien til vinduer, gjøre varmegjenvinnere mer effektive, samt effektivisere isolasjonsløsninger. Dette vil føre til at det i fremtiden vil være betraktelig enklere å bygge passivhus i kaldere strøk, enn det som er mulig per dags dato. Standarden spesifiserer at om mer enn 50 % av energibehovet til varmtvann dekkes av en fornybar energikilde, vil det resterende energibehovet kunne dekkes av elektrisitet. Herunder er løsninger som solfanger, varmepumpe i kombinasjon med vannbåren varme gode alternativer. Kombinasjonen av flere tiltak gjør et passivhus til et energieffektivt bygg med redusert energiforbruk sammenlignet med konvensjonelle bygninger [43, 42].

Solens stråling kan generere varme selv uten tilknytning til et system, noe som kan være både

fordelaktig og en ulempe. Figur 2.6 illustrerer ulike tiltak som både er relativt enkle og som må planlegges allerede tidlig i planleggingsfasen. Solens høyde varierer ut fra geografisk plassering og vil i Norge være lavere enn figuren illustrerer. På varme sommerdager er det behov for å skjerme ut solen for å opprettholde ønsket temperatur innendørs, mens på kalde vinterdager er det ønskelig at solinnstrålingen bidrar passivt til oppvarming. Passive tiltak som kan gjøres er blant annet god planløsning med tak og vinduer som kan bidra til skjerming og enkel ventilasjon. I tillegg vil gjennomtenkt plassering av trær bidra til solskjerming om sommeren, og samtidig slippe solen inn om vinteren da bladene har falt av [44].



Figur 2.6: Passive tiltak på bygninger fra solinnstråling [44].

Nullhus

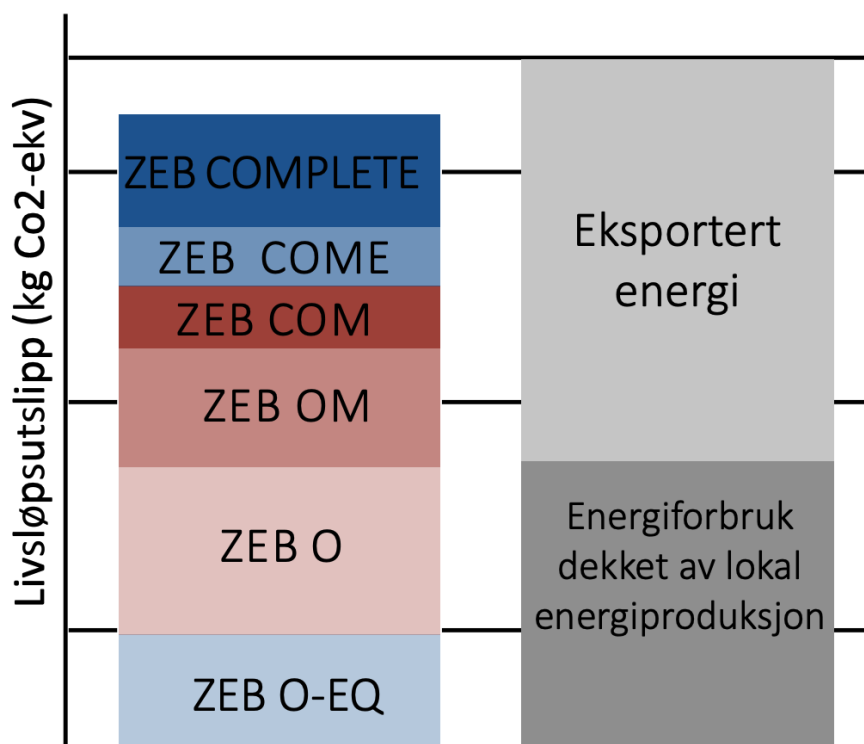
Zero Emission Buildings (ZEB) er bygninger som oppnår netto null i klimautslipp gjennom hele sin levetid ved hjelp av egenprodusert fornybar energi. For utviklingen og modifiseringen av ZEB har det blitt dannet en forskningsgruppe og et ZEB-laboratorium. Dette bygget fungerer til vanlig som et kontorbygg hvor det kontinuerlig forskes og utvikles innovative løsninger i interaksjon med mennesker. Bygget fungerer derfor som et levende laboratorium, ettersom bruken av lokalene gir variasjon i belastning og muliggjør modifisering og endring av bygningsfasade og komponenter [45].

ZEB forskningscenter for miljøvennlig energi (FME ZEB) har definert fem ulike grader av nullutslippsbygg som er listet opp under. Dette er typer nullutslippsbygg som varierer i hvor

mye av utslippet som det kreves at fornybar energi skal kompensere for [46, 47, 45, 48].

- ZEB O-EQ: Klimagassutslippet fra drift av bygningen kompenseres med fornybar energiproduksjon. Dette gjelder ikke energi som går til bruk av utstyr.
- ZEB O: Klimagassutslippet fra drift av bygning kompenseres med fornybar energiproduksjon.
- ZEB OM: Klimagassutslippet fra drift og produksjon av materialer kompenseres med fornybar energiproduksjon.
- ZEB COM: Klimagassutslippet fra produksjon av materialer, bygging og drift kompenseres med fornybar energiproduksjon.
- ZEB COME: Klimagassutslippet fra produksjon av materialer, bygging, drift og avhending kompenseres med fornybar energiproduksjon.
- ZEB COMPLETE: Klimagassutslippene fra hele bygningens levetid kompenseres med fornybar energiproduksjon.

Figur 2.7 illustrerer de ulike gradene av ZEB og hvor mye av livsløpsutslippet som skal kompenseres for gjennom lokal produksjon av fornybar energi.



Figur 2.7: Illustrasjon av ambisjonsnivå for ZEB, med økende krav av energiforbruk som dekkes av lokal energiproduksjon [49].

Plusshus

Plusshus er en bygning som produserer mer energi enn det selv bruker. Dersom det i fremtiden blir ytterligere muligheter for å overføre overskuddsenergi til andre bygninger i området, vil behovet for import av ekstern energi reduseres. *SINTEF Community* har utgitt innspill til handlingsplanen for energieffektivisering utgitt av Olje- og energidepartementet (OED). I denne utgivelsen blir det foreslått plusskunde avtale for overskuddsvarme, i likhet med plusskunde avtale for overskuddselektrisitet. Denne ordningen gjør at overskuddsvarme kan selges tilbake til fjernvarmenettet, mens elektrisitet kan selges til kraftnettet [14, 30].

Plusskunde ordningen for elektrisitet gjør at overskuddsenergi til plusshus ikke går tapt. Ordningen har likevel flere restriksjoner som begrenser deling av energi. Noen av restriksjonene er at kunden ikke kan levere mer enn 100 kW tilbake til strømmettet, og må betale fastledd for all innmating dersom dette overskrides. Plusskunden må også være kunde hos en kraftleverandør som har en slik avtale. Fra 1. oktober 2023 ble det mulig at kunder innenfor samme eiendom kan dele overskuddsproduksjon. Denne løsningen innebærer en geografisk avgrensning for hvem som kan delta, samt en produksjonsbegrensning på 1 MW vekselstrøm per eiendom. I tillegg er det begrensning på at allerede delt energi ikke kan selges videre, samt at kunder som mottar denne energien ikke kan ha produksjon bak eget målepunkt [50].

2.3.6 Teknologisk utvikling

Klimautfordringene påvirkes av en rekke faktorer, herunder økonomiske, politiske, teknologiske, sosiale og miljømessige forhold. Utvikling av framtidssbilde, som inkluderer overgangen til å bli et lavutslippssamfunn innen år 2050, er beskrevet som en samfunnsmessig transformasjon. Transformasjonen inkluderer tre sfærer; den praktiske sfære, den politiske sfære og den personlige sfære som er illustrert i Figur 2.8. Den praktiske sfære innebærer tekniske og atferdsmessige responser, blant annet lavutslippsteknologi, fornybare energiløsninger, nye innovasjoner og mer bærekraftig tilnærming i utdanning og hverdag. Det meste av strategier og tiltak som må til for å klare overgangen til et lavutslippssamfunn inkluderes i denne sfæren. Den politiske sfære innebærer systemer og strukturer som enten vil hjelpe eller hemme endringer som kommer i den praktiske sfæren. Det inkluderer normer og regler, reguleringer og avtaler, insentiver og prioriteringer, forhandlinger og vedtak. Den politiske sfæren kan utløse konflikter når det kommer til prioriteringer og handlinger. Den personlige sfæren innebærer både individuelle og felles holdninger og verdier, samt verdensbilder. Denne delen legger fokus på de sosiale og kulturelle sidene av handlinger og prioriteringer, som fastsettes i den politiske sfæren. Deriblant om de vil hjelpe eller hindre nødvendige steg for å oppnå et lavutslippssamfunn [51, 52].



Figur 2.8: De tre ulike sfærene som påvirker transformasjoner i samfunnet; praktisk, politisk og personlig [52].

For norske strømkunder består strømrregninga av tre deler; en del av regninga går til strømprodusent, en del går til nettleie og en del går til å dekke skatter og avgifter. Det vil være fordelaktig å bruke egenprodusert strøm kontra å selge til strømselskaper, ettersom forbruket går ned og hver del av strømrregninga vil bli mindre. Ved salg av strøm vil nettselskapet kun betale for overskuddsstrøm og ikke for nettleie eller skatter og avgifter. Skatteetaten mener at salg av overskuddsstrøm skal skattes som kapitalinnsats med 22 %. Nelfo påpeker at dette vil medføre at færre privatkunder investerer i solcellepanel. Enova har i tillegg kuttet ned på hvor mye støtte husholdninger kan få ved kjøp og installasjon av solcellepanel [53, 54, 55].

2.3.7 Nullutslippsnabolag

Utviklingen av bærekraftige nullutslippsområder vil spille en avgjørende rolle for progresjonen mot et lavutslippsamfunn. Dette er formålet til forskningssenteret for nullutslippsområder (FME ZEN) som er et prosjekt med 8 års varighet og omtrent 400 MNOK i tildelte midler. Senteret har gjennom samarbeid med flere aktører bidratt til planlegging, utvikling og drift av nullutslippsområder. Gjennom prosjektperioden som avsluttes i 2024 har det blitt utviklet ni nullutslippsområder. Disse har blitt benyttet til utprøving av systemer og innovative løsninger. FME ZEN er ledet av NTNU, sammen med SINTEF Community og SINTEF Energi og har i alt gitt ut 5 versjoner av ZEN-definisjonsrapporter, hvor siste versjon ble publisert april 2024

[56, 57].

For å oppnå målsetningen for forskningscenteret har det blitt utarbeidet en definisjon av Zero Emission Neighbourhood (ZEN), sammen med ulike verktøy – for å vurdere utvikling og prestasjon av nullutslippsområder. ZEN har som mål å redusere direkte og indirekte klimagassutslipp til null. Gjennom analyseperioden og i henhold til valgt ambisjonsnivå, bør området ha fokus på seks følgende punkter, som er gjengitt fra ZEN rapport versjon 4.0 og listet opp under [58]:

- *Planlegging, design og drift av bygninger og deres tilhørende infrastrukturkomponenter med sikte på **null klimagassutslipp** over livsløpet og å kompensere gjenstående klimagassutslipp for å oppnå et netto nullutslippsområde.*
- *Oppnåelse av høy **energieffektivitet** og en høy andel av **ny fornybar energi** i områdets forsyningssystem for energi.*
- *Smart styring av energiflyten i området (i bygg og mellom bygg) og av utvekslinger med det omkringliggende energisystemet, som sikrer **fleksibilitet**.*
- *Fremme **bærekraftige transportmønstre** og smarte mobilitetssystemer.*
- *Planlegging, design og drift med hensyn til **økonomisk bærekraft**, ved minimerte levetidskostnader for å oppnå prisgunstige nullutslippsområder og velge kostnadsoptimalt tiltak for å redusere klimagassutslipp.*
- *Arealplanlegging sikrer god **byform og arealbruk** og stimulerer til bærekraftig atferd.*

For samtlige av disse punktene er det seks kategorier som er med på å definere ZEN. Disse kategoriene er klimagassutslipp, energi, effekt, byform og arealbruk, mobilitet og økonomi. Klimagassutslipp måles i kg CO₂-ekvivalenter for både direkte og indirekte klimagassutslipp. Energi og effekt i forhold til energisystemer er henholdsvis nettbelastning over tid målt i kWh og nettbelastning målt i kW. Byform og arealbruk referer til blant annet arealbruk og form på bygninger mens mobilitet referer til beboere og deres transportmønstre til og fra et område. Økonomi beskrives som økonomisk bærekraft som inkluderer livssyklus-kostnader for bygninger, energi, annen infrastruktur for området samt total livssyklus-kostnad for energisystemet.

Hver av disse kategoriene inneholder ett eller flere vurderingskriterier som igjen inneholder et sett med nøkkelindikatorer (KPI). For å kunne måle progresjon og prestasjon på et nullutslippsområde benyttes KPI i form av tallfestede indikatorer. Vurderingskriterier som benyttes for klimagassutslipp er utslippsreduksjon og kompensasjon som blant annet inneholder nøkkelindikatorer materialer, bruk, energibruk i drift og slutfasen. For energi benyttes

kriteriene energieffektivitet i bygninger og energibærere med KPI som levert energi, energibehov i bygg og levert energi. Effekt benytter vurderingskriteriene effektivitet og lastfleksibilitet med blant annet KPI energibelastning, maksimal last og endring i levert energi. På tvers av disse ZEN-kriteriene varierer systemgrenser og nøkkelindikatorer skal vurderes av flere relevante aktører for ulike prosjektfaser. Mer detaljert og utfyllende tabell for vurderingskriteriene finnes i Vedlegg B.

Som det refereres til i ZEN-rapport versjon 1.0, er den mest miljøvennlige energien den som ikke brukes. Det er flere målsetninger for å oppnå et nullutslippsområde. Noen av målene som er mest aktuelle er høy energieffektivitet samt reduksjon av energibehovet. ZEN har også et stort fokus på effektflyt og effekttopper da energistrømmer i et slikt område blir utvekslet for å oppnå fleksibilitet. Bygninger innenfor et nullutslippsområde skal produsere fornybar energi tilpasset bygningens behov, slik at import og eksport av energi vil minimeres. For verneverdige bygg som skal renoveres kan det være vanskelig å nå ZEB-krav, men i samspill med andre bygg kan målet om nullutslippsområde fortsatt være mulig [46, 48, 59].

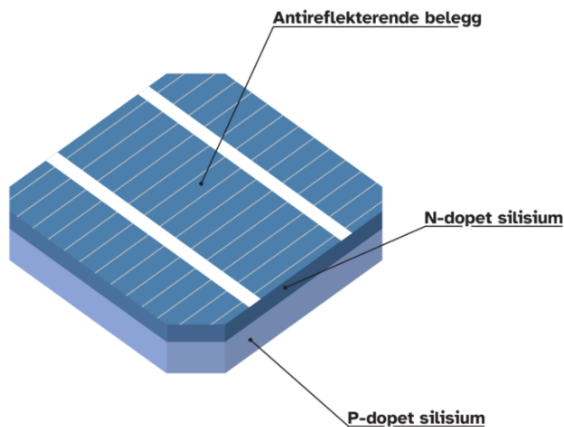
2.4 Solproduksjon

Solproduksjon er en sentral bidragsyter i arbeidet med å oppnå nullutslippsområder. Hvert år mottar jorden 15 000 ganger mer energi fra solen enn det som benyttes, som indikerer et stort ubenyttet potensial. I Norge er de fleste anleggene små og koblet til privatboliger, og sammenlignet med andre land er solproduksjon lite utbredt [60].

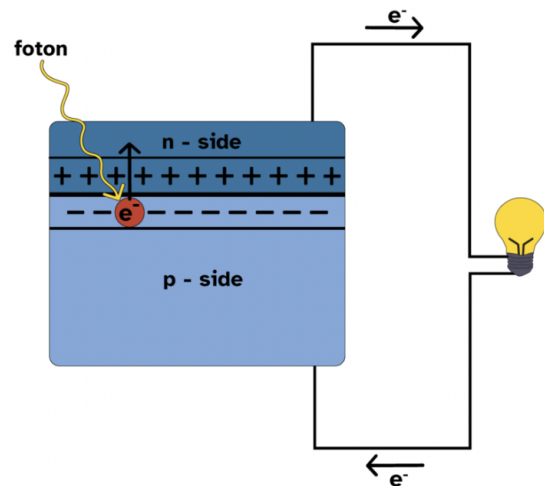
2.4.1 Solcelle

Figur 2.9 illustrerer oppbygningen til en solcelle og den består av et tynt antireflekterende belegg og en halvleder. Solceller genererer energi ved at fotovoltaiske celler konverterer energien i solstrålene til elektrisk energi. 95 % av alle solcellene som selges består av halvledermaterialene monokrystallinsk eller multikrystallinske silisium. Silisium er et grunnstoff med fire elektroner i ytterste skall. Etersom atomet ønsker å oppfylle oktettregelen, vil elektronene koble seg til hverandre og danne et krystallgitter. Dette fører til at elektronene ikke flyter fritt, og vil dermed ikke lede elektrisitet. Ved hjelp av doping kan elektronenes sammensetning og halvlederens egenskaper endres. For å få en fri flyt av elektroner må en silisiumsolcelle bestå av to lag med dopet silisium, en positiv side (p-side) og en negativ side (n-side). P-siden har plass til flere elektroner, mens n-siden har overskudd av elektroner. På grunn av ulik ladning, vil elektronene flytte seg fra n-siden til p-siden. Det vil oppstå en barriere mellom lagene som forhindrer at elektroner flyter helt fritt. Lysfotoner fra sola vil treffe barrieren og frigjøre elektroner, som medfører at det blir et ekstra elektron på n-siden og en ledig elektronplass på p-siden. Som

illustrert i Figur 2.10 kobles solcellen til en elektrisk krets. Elektronet vil kunne gå fra n-siden og feste seg til den ledige plassen på p-siden, men vil på grunn av spenningsforskjeller i barrieren ikke bevege seg samme vei tilbake. Elektronet må derfor sirkulere i den påkoblede kretsen og slik genereres det elektrisitet [61, 62].



Figur 2.9: Illustrasjon av et snitt av en silisium-solcelle og dens oppbygning [63].



Figur 2.10: Illustrasjon av hvordan et lysfoton frigjør et elektron og hvordan elektronet (e^-) beveger seg i en solcelle [63].

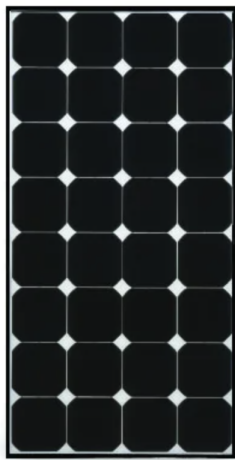
2.4.2 Ulike typer solcellepanel

Solcellepanel deles inn i tre ulike typer etter teknologi og bruksområde. Monokrystallinsk, multikrystallinsk og tynnfilm-solceller er de vanligste solcellepanelene.

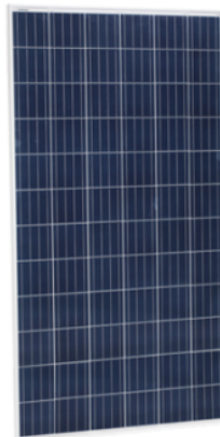
Monokrystallinske solceller består av en silisiumkrystall som peker i en bestemt retning, som medfører en homogen, svart overflate med avrundede hjørner som absorberer sollyset, vist i Figur 2.11. Solcellene er montert på et metallgitter som leder kontakten mellom de ulike krystallene, og mellom to lag med glass eller ett lag glass og ett lag plastikk. Monokrystallinske solceller har høyere virkningsgrad enn multikrystallinsk og tynnfilm, og den ligger mellom 18 - 24 %. Produksjonsprosessen for monokrystallinske paneler er derimot mer energikrevende og mer kostbar sammenlignet med andre teknologier. Multikrystallinsk solceller er som oftest også silisiumbasert med en virkningsgrad mellom 12 - 18 %. De er bygd opp av flere silisiumkrystaller som er smeltet sammen og danner skiver. Panelene har en blå fargetone og skarpe hjørner, illustrert i Figur 2.12 [61, 62, 64].

Tynnfilm-solceller benytter materialer med et direkte båndgap som dermed muliggjør absorpsjon av lysfotoner i et tynt lag. Paneler av tynnfilm har en mørk, homogen overflate, illustrert i Figur 2.13. Flexibiliteten i dette panelet gjør at de kan benyttes der krystallinske solceller ikke er optimalt. Tynnfilm-solceller er et godt alternativ til områder med lite sollys og mye skygge,

ettersom de er satt sammen flere lag med fotovoltaiske elementer. Tynnfilm-solceller har lavere virkningsgrad, mellom 8 - 12 %, sammenlignet med krystallinske teknologier. Det er vanligst å benytte amorft silisium, Kobber-indium-gallium-selenid (CIGS) eller kadmiumtellurid (CdTe). Amorft silisium har en struktur uten regelmessig oppbygning, og kan derfor ikke dopes for å få ønskede egenskaper. En fordel er likevel at kun 1 - 5 % av råmaterialet brukt i krystallinske solceller, trengs i denne type solpanel. CIGS er fleksibelt og lett, noe som gjør den til en ettertraktet modul. Den inneholder derimot Indium som er et sjeldent råstoff som har høye kostnader. CdTe er den vanligste tynnfilm-teknologien – med 50 % av markedsandelen, men inneholder derimot det svært helse- og miljøskadelige grunnstoffet kadmium [64, 65].



Figur 2.11: Monokrystallinsk solcellepanel [66].



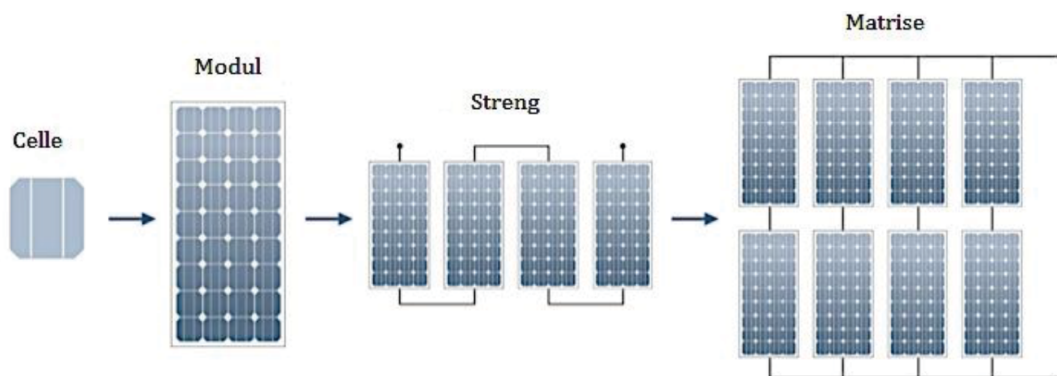
Figur 2.12: Multikrystallinsk solcellepanel [67].



Figur 2.13: Tynnfilm solcellepanel [68].

2.4.3 Optimalisere solenergi

For å optimalisere produksjon er det hensiktsmessig å kunne øke spenningen ved å koble cellene sammen i seriekobling. I en matrise, også kalt solcelle-system, er flere strenger koblet sammen i parallell for å øke ytelsen ytterligere. Figur 2.14 illustrerer en enkel solcelle koblet sammen i en modul og videre i en streng og matrise [69].



Figur 2.14: Illustrasjon av oppsett fra enkeltstående solcelle til en matrise av solcellemoduler [69].

For å kunne benytte energien som produseres fra solcellepanelene er det nødvendig med en inverter. Solcelle systemet produserer likestrøm (DC) som må konverteres til vekselstrøm (AC) før det kan benyttes i bygninger. Et system med solceller kan kobles til nettverket enten med eller uten batterier. En optimal utnyttelse av fleksibiliteten sammen med automatisering og smart styring vil kunne bidra til redusert import av elektrisitet fra nettet [64, 69, 14].

Solinnstrålingen, sammen med solcellepanelets orientering og helningsvinkel, er de primære faktorene som påvirker virkningsgraden. Imidlertid er det flere variabler som også spiller en vesentlig rolle i ytelsen til solcellepanelet, deriblant valg av teknologi, materialer, elektriske komponenter og inverter. Vedlikehold og rengjøring av panelene er viktig for å opprettholde god virkningsgrad. I tillegg er det mange forhold som er vanskelig å kontrollere men som også er med å påvirke virkningsgraden. Varme solcellepanel reduserer også effektiviteten. Det betyr at kaldt klima, spesielt sammen med vind, forsterker konveksjonen og dermed øker effektiviteten til solpanelene. Virkningsgraden øker også med refleksjon fra omgivelser, gode eksempler er snø på bakken, speilblank sjø og skyer på himmelen, også kjent som albedo-effekten. Tett skydekke og tåke, samt luftforurensning og sveve-støv vil hindre solinnstråling og dermed påvirke mengden solproduksjon. Forhold som minker effektiviteten ytterligere er slitasje og skygge fra eksempelvis bygninger og trær. Solceller i samme modul er ofte koblet sammen i serie. Det betyr at hvis en del av modulen er dekket av skygge, eller generelt mindre effektivitet, vil hele modulen begrenses av effekten til den svakeste cellen [64].

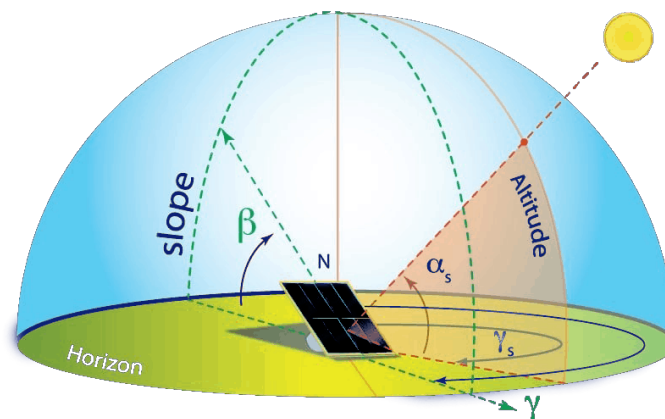
Virkningsgraden til en solcelle er et mål på hvor effektivt energien i sollyset blir omdannet til elektrisk energi. Formel 2.1 viser hvordan virkningsgraden beregnes [70].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inn}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{P_{inn}} \quad (2.1)$$

Hvor:	η	Virkningsgrad	[-]
	P_{max}	Maksimal effekt produsert	[W]
	P_{inn}	Effekt i sollyset	[W]
	I_{max}	Strøm ved maksimal effekt	[A]
	V_{max}	Spenning ved maksimal effekt	[V]

Den optimale vinkelen for et solcellepanel varierer i tidspunkt på døgnet og året. Den nordlige halvkule heller bort fra solen mellom høstjevndøgn og vårjevndøgn og mot solen motsatt. Deklinasjonsvinkelen er lik 0° ved høst- og vårjevndøgn, $23,45^\circ$ ved sommersolverv og $-23,45^\circ$ ved vintersolverv. For å kunne beregne solens stråling mot jorden må det tas hensyn til deklinasjonsvinkelen, som er vinkelen mellom ekvator og solas bane rundt jorden. Optimal gevinst fra solcellepanelet oppnås når solstrålene treffer vinkelrett på panelet. Solhøyde-,

helnings- og asimutvinkelen er avgjørende for effekten som kan oppnås med solcellepanelet og er illustrert med henholdsvis α , β og γ i Figur 2.15. Solhøydevinkelen beskriver hvor høyt sola står i forhold til horisontaloverflaten. Helningsvinkelen er vinkelen mellom den horisontale overflaten og selve solcellepanelet. Asimut er vinkelen til solas posisjon østover fra nord. Solcellepanelene må derfor vinkles optimalt slik at de mottar så mye solinnstråling som mulig gjennom hele året [64].



Figur 2.15: Oversikt over forskjellige vinkler som er avgjørende for optimalisering av solcellepanel [71].

Solinnstrålingen blir påvirket av atmosfæriske effekter, slik som absorpsjon, spredning og refleksjon. Dette fører til at et solcellepanel kan motta lysfotoner fra direkte og diffus stråling. Direkte stråling er når lysfotonene treffer direkte uten noen form for hindring, mens diffus stråling er når solstrålene blir forstyrret av elementer og sollyset spres. Den totale strålingen som til slutt treffer et solcellepanel kan inneholde direkte stråling, diffus stråling og reflektert stråling. Air Mass (AM) er en faktor som angir hvor mye solstrålene må passere på veien ned til jordoverflate [64].

Formel 2.3 og 2.2 beregner energiproduksjon ved hjelp av solinnstråling, virkningsgrad og areal. Installert effekt er gitt i W_p som er effektkapasiteten ved standard testforhold og energiproduksjon er gitt i kWh/h [61].

$$E = \frac{G(i) \cdot \eta \cdot A}{1000} \quad (2.2)$$

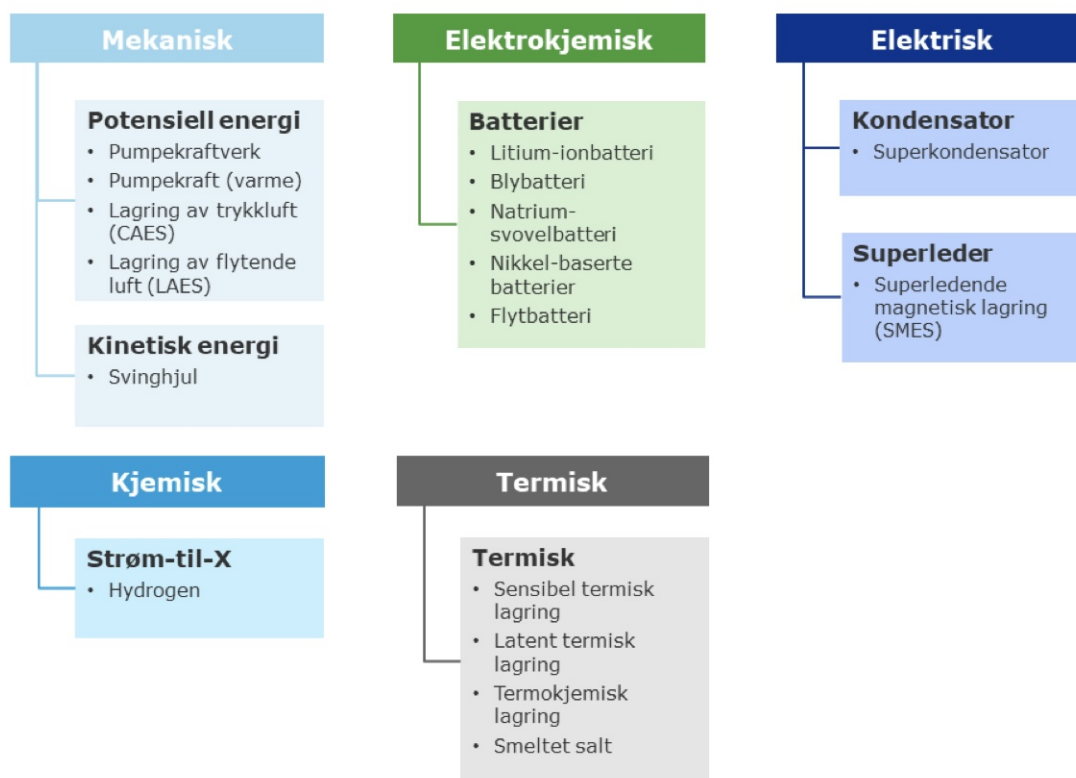
$$E_{maks} = \frac{G_{maks} \cdot \eta \cdot A}{1000} \quad (2.3)$$

Hvor:	E	Energiproduksjon	[kWh/h]
	E_{maks}	Installert effekt?	[kW _p]
	G	Solinnstråling	[W/m ²]
	η	Virkningsgrad	[-]
	A	Areal	[m ²]

2.5 Energilagring

Mer enn 80 % av energiforbruket kommer fortsatt fra fossil opprinnelse. Dette understreker nødvendigheten av å implementere bærekraftige og fornybare tiltak for å kunne nå verdens klimamål. Etttersom produksjon og forbruk av energi ikke alltid sammenfaller øker behovet for lagring av energi [72].

Ulike teknologier for energilagring er blant annet mekanisk, kjemisk, elektrokjemisk, termisk og elektrisk. Det finnes varierende teknologi for energilagring, avhengig av hvordan energien lagres, lagringskapasitet, hvor lenge energien kan lagres og til hvilke kostnader. Vedlegg C illustrerer egnethet for ni ulike lagringsteknologier. Vedlegget refererer til LIB som en fleksibel energilagringsteknologi, da det er velegnet for flere bruksområder. Figur 2.16 illustrerer kategorisering av energilagring med tilhørende teknologier [72, 73].



Figur 2.16: Kategorisering av ulike teknologier for energilagring [73].

Flytbatteri blir også nevnt som en lagringsteknologi som egner seg til mye av det samme som LIB. Redoks er det vanligste flytbatteriet. Det lagrer flytende elektrolytter i separate tanker som gjør effekt og energi uavhengige av hverandre. Ulempen med flytbatteri er at det har noe lavere energitetthet, lavere virkningsgrad og et høyere krav til vedlikehold. Flytbatteri er en mindre utprøvd teknologi enn LIB, men egner seg godt for bruksområder med behov for større lagringsenheter, behov for høyere sikkerhet eller for bruksområder som vil justere energi og effekt

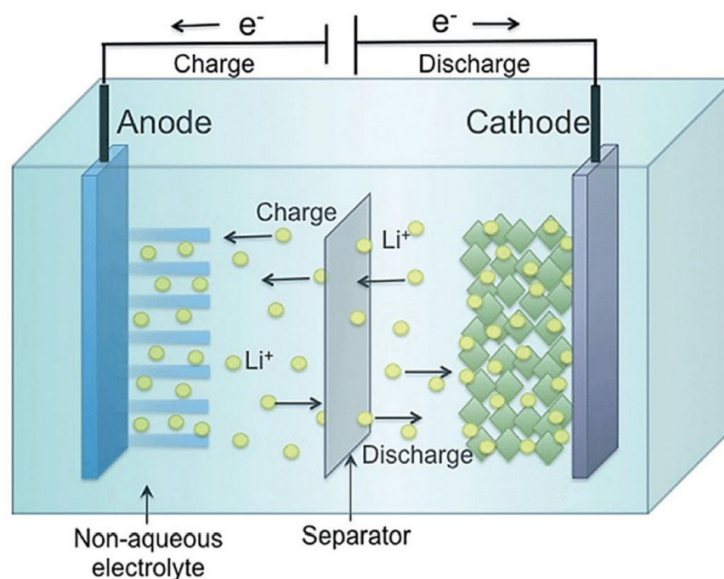
uavhengig av hverandre [73].

2.5.1 Litium-ion batteri

Batteri er en form for elektrokjemisk energilagring som er mye utbredt. Et batteri består av en eller flere galvaniske celler hvor energi lagres som kjemisk energi og omformes til elektrisk energi ved elektrokjemiske reaksjoner. Det eksisterer flere batterityper med varierende teknologier tilpasset ulike formål. Avgjørende egenskaper er blant annet kapasitet, effektivitet og levetid. Litium-ion batteri (LIB) er et velkjent og godt testet sekundærbatteri som benyttes i flere ulike komponenter, blant annet i mobiltelefoner og biler. TRL-nivå (technology readiness level) som går fra én til ni forteller hvor moden en teknologi er, hvor nivå én utgjør starten av forskning. DNV (Det Norske Veritas) har gjort en studie på *Lagringsteknologier for fleksibilitet i energisystemet* i 2020 hvor ulike lagringsteknologier har blitt sammenlignet. Rapporten drar frem LIB som en teknologi med mange gjennomførte og planlagte prosjekter. I samme rapport er LIB plassert mellom TRL-nivå 8 og 9, og forventes i 2030 å være underlagt nivå 9 [73].

Generelt er et LIB kostbart, men teknologien forventes å bli rimeligere frem mot 2030. Egenskaper som fremmer LIB og som gjør det til et aktuelt batteri for energilagring i bygninger, er høy energitetthet, høy virkningsgrad, fallende kostnader, lang levetid og lite krav til vedlikehold. Levetiden for LIB er rundt 15 år og forventes med teknologisk utvikling å øke til nærmere 20 år. Kostnadene for LIB ligger nå mellom 1 610 - 1 890 NOK/kWh og forventes å reduseres til nærmere 870 - 915 NOK/kWh [72, 74, 75, 76, 77].

Figur 2.17 illustrerer et LIB med fire hovedelementer, henholdsvis anode, separator, katode og elektrolytt. Li-ioner beveger seg fra anoden og fester seg mellom lagene i katodestrukturen ved utladning. Ved oppladning skjer det motsatte, positive Li-ioner beveger seg fra katoden og fester seg mellom lagene i anodestrukturen. Egenskapene til batterier blir definert av materialene som benyttes i ulike elementer og kan derfor variere. I et LIB er anoden som oftest grafitt fordi det er et rimelig og lett tilgjengelig materiale. Titan og silisium er også anoder som forskes på og benyttes i enkelte batterier. Elektrolytten er en miks av organiske løsemidler og litiumsalt. Separatoren skal hindre direkte kontakt mellom anoden og katoden, og fungerer derfor som en sikkerhet for å unngå kortslutninger i batteriet. Polyetylen og polypropylen er de mest kjente materialene for separator. Katoden i et LIB består i dag hovedsaklig av litium, oksygen (derav metalloksider) i tillegg til en variasjon i metaller som er den vanligste måten å skille de ulike typene på. Materialene som brukes i batterier påvirker tilgjengelighet, sikkerhet, stabilitet samt energitettheten. Noen av katodematerialene som benyttes i LIB er blant annet kobolt, mangan, jern, fosfat og nikkel [78, 79, 80].



Figur 2.17: Illustrasjon av hovedelementene i et litium-ion batteri [80].

Tabell 2.18 har listet opp fem ulike LIB med grafitt som anodemateriale og varierende katodematerialer med tilhørende egenskaper [81].

Tabell 2.2: Oversikt over ulike typer litium-ion batterier med grafitt som anodemateriale og ulike materialer for katoden [78, 82, 83]

Batteritype	LFP	LCO	LMO	NMC	NCA
Katodemateriale	$LiFePO_4$	$LiCoO_2$	$LiMn_2O_4$	$LiNi_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33}O_2$	$LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_2$
Nominell spenning [V]	3,2 / 3,3	3,6	3,7	3,6 / 3,7	3,6
Levetid [år]	5 - 10	5 - 7	10 - 30	3 - 6	3 - 6
Levetid [syklus]	3 000 - 6 000	500 - 1 000	1 000 - 1 500	1 000 - 2 000	200 - 260
Spesifikk energi (kapasitet) [Wh/kg]	90 - 120	150-200	100 - 150	150 - 220	200 - 250
C-rate (lading)	1,0	0,7 - 1,0	0,7 - 1,0	0,7 - 1,0	0,7
C-rate (utlading)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Termisk nedsmelting [°C]	270	150	250	210	150
Bruksområde (eksempler)	bærbar og stasjonær, tåler høy belastning og utholdenhet	mobilttelefon, pc, kamera	medisinske utstyr, elektroverktøy	e-sykler, medisinsk utstyr, kjøretøy, industri	medisinsk utstyr, industri, Tesla

LIB har utfordringer som er knyttet til sikkerhet, ressursbruk og miljø. Kobolt og nikkell som benyttes i denne batteritypen er ikke utømmelige og det er store forbedringer på resirkulering av batteritypen. Det forskes på ulike kjemiske sammensetninger og materialbruk for å kunne redusere risiko for brann i batteriet. *IntelLiGent* er et forskningsprosjekt med varighet fra 2022 til 2025 som skal utvikle et LIB med høyere energitetthet, levetid og ladehastighet basert på høyspenningskatoder og høykapasitet silisium-grafittanoder. I forbindelse med bruksområdet hvor LIB benyttes i bygninger er brannsikkerhet en viktig faktor. Batterier i elektriske biler som til slutt får lavere virkningsgrad enn 90 %, vil ikke lenger benyttes i kjøretøyene og battericellene kan dermed få nytt bruksområde i blant annet bygninger. Gjenbruk av LIB, vil gi betydelig lavere

utslippsintensitet enn nyproduserte LIB. Battericellene som skal gjenbrukes i bygninger må likevel oppfylle forskriftskrav. For stasjonært bruk er overoppheting under lading eller utlading de vanligste årsakene for brann. Hvis det mot formodning skulle oppstå brann i et LIB – er den eksplosiv. Forebyggende tiltak som sensorer og overvåking er derfor essensielt. Batterier må også plasseres i brannsikre deler av bygget med gode brannsikringstiltak, spesielt i boliger [84, 75, 73, 85].

Figur 2.18 illustrerer LFP som det katodematerialet som dekker egenskapene sikkerhet, effekt, varighet, tilgjengelige materialer og tilstrekkelig ytelse [75, 79, 73].



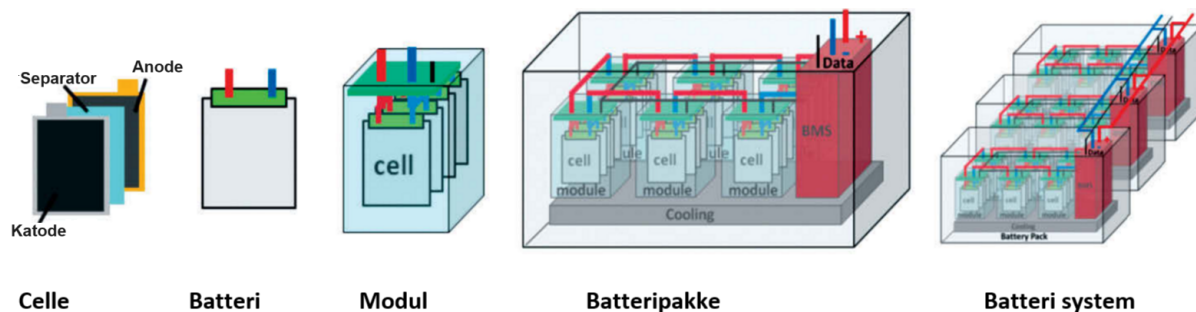
Figur 2.18: Illustrasjon av ulike egenskaper for utvalgte katodematerialer i LIB [79].

Som figuren viser, er katodematerialet LCO rangert lavest med hensyn på sikkerhet grunnet lav termisk stabilitet av kobolt-oksiden. Kobolt er et kostbart materiale som medfører at katodematerialer som LCO, NCA og NCM er dyrere enn LFP. De to sikreste katodematerialene er LFP og LMO, der LFP har bedre holdbarhet og levetid. LFP tolererer drift med state-of-charge (SoC) intervall på 15 - 100 % og har stort potensiale i kombinasjon med kraftnettet og

andre energisystemer. NCA batterier benyttes blant annet i Teslas elektriske biler og har i tillegg potensiale for kombinasjon med andre energisystemer og nett-tilkobling. LFP er likevel rangert med bedre sikkerhet på grunn av lav mottakelighet for termisk nedsmeltning sammenlignet med NCA og LCO [79, 80].

2.5.2 Egenskaper for batterilagringssystemer

Et batteri energilagringssystem, også kalt BESS (Battery Energy Storage System) er ofte bygd opp av flere batteripakker, slik Figur 2.19 illustrerer. I et batteri kan cellene kobles i parallell for å øke kapasiteten, og i en modul kan flere batterier kobles i serie for å øke spenningen. En batteripakke kan bestå av flere batterier eller flere moduler, mens et system består av flere batteripakker [86].



Figur 2.19: Batteriets oppbygging fra battericelle til et totalt batterisystem [86].

Et eksempel på et BESS er ES20001000-S, fra leverandør *Evesco*. Tabell 2.3 presenterer noen av spesifikasjonene til én slik batteripakke. I Vedlegg D blir ytterligere spesifikasjoner presentert. Batteripakken har en kapasitet på 2 064 kWh og en installert effekt på omtrent 1 MW.

Tabell 2.3: Batteri spesifisering for en batteripakke [87]

Nominell energi	Effekt (AC)	Nominell kapasitet	Nom. DC spenning	Maks opp-/utlading	Nettkoblet AC-tilkobling	Cellesykluser @ 25 °C
2 064 kWh	1 000 kW	1 680 Ah	1 228.8 V	836,8 A	690 VAC 50/60 Hz	5 000

Formel 2.4 beregner effekt ved hjelp av spenning og strøm.

$$P = V \cdot I \quad (2.4)$$

Hvor: P Effekt [W]
 V Spenning [V]
 I Strøm [A]

Korttidslagring av elektrisk energi over timer eller dager er godt egnet i elektrokjemisk teknologi.

For et batteri tilkoblet et energisystem i en bolig vil det være ulike krav for blant annet C-rate, SoC og state-of-health (SoH). C-raten beskriver hastigheten som et batteri utlades med i forhold til batteriets kapasitet. For et solcellesystem tilkoblet en bolig med et energibehov på omtrent 0.1 - 10 kWh, vil det kreve en C-rate på opptil 10. SoC beskriver driftsforholdene til et batteri i forhold til gjenværende kapasitet og indikerer når det bør lades eller utlades. Batterier har en egenutladning og en ytelsen som svekkes over tid, dette kan indikeres som SoH [81, 72, 88].

Formel 2.5 gir C-rate til batteriet. Det er batteriets evne til å levere strøm. C-verdi lik 2C betyr at batteriet kan levere fra seg sin totale kapasitet på 30 minutter, og 0,5C betyr henholdsvis fra 100 % til helt utladet på 2 timer. Formel 2.6 viser andelen av batteriet som er oppladet. SoC er oppgitt i prosent.

$$C\text{-rate} = I/C \quad (2.5)$$

$$SoC = \frac{Q}{C} \cdot 100 \% \quad (2.6)$$

Hvor:	C-rate	Opp- og utladningsevne	[-]
	C	Nominell Kapasitet	[Ah]
	SoC	State of Charge	[%]

Formel 2.7 viser utregningen til netto forbruk av energi. Formel 2.8 viser mengde energi som kan lagres i batteriet.

$$\text{Netto energi}(i) = \text{Forbruk}(i) - E(i) \quad (2.7)$$

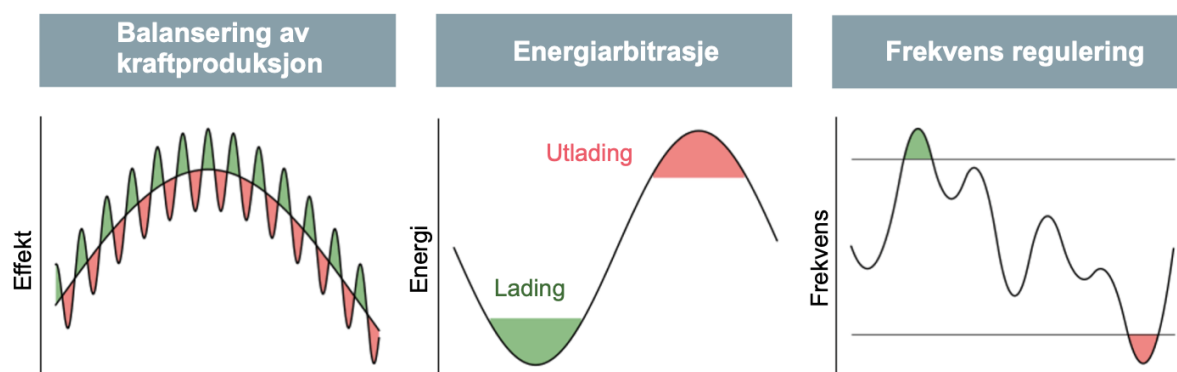
$$Q(i) = E(i) - \text{Forbruk}(i) \quad (2.8)$$

Hvor:	Netto energi	[kWh]
	Forbruk	[kWh]
(i)	Tidspunkt i	[-]
Q	Gjenværende ladning	[kWh]

2.5.3 Fordeler med energilagring

Figur 2.20 illustrerer tre fordeler ved å benytte seg av batterilagring. Mulighetene for å kombinere batteri med fornybare kilder eller tilkobling på det elektriske nettet er et voksende marked.

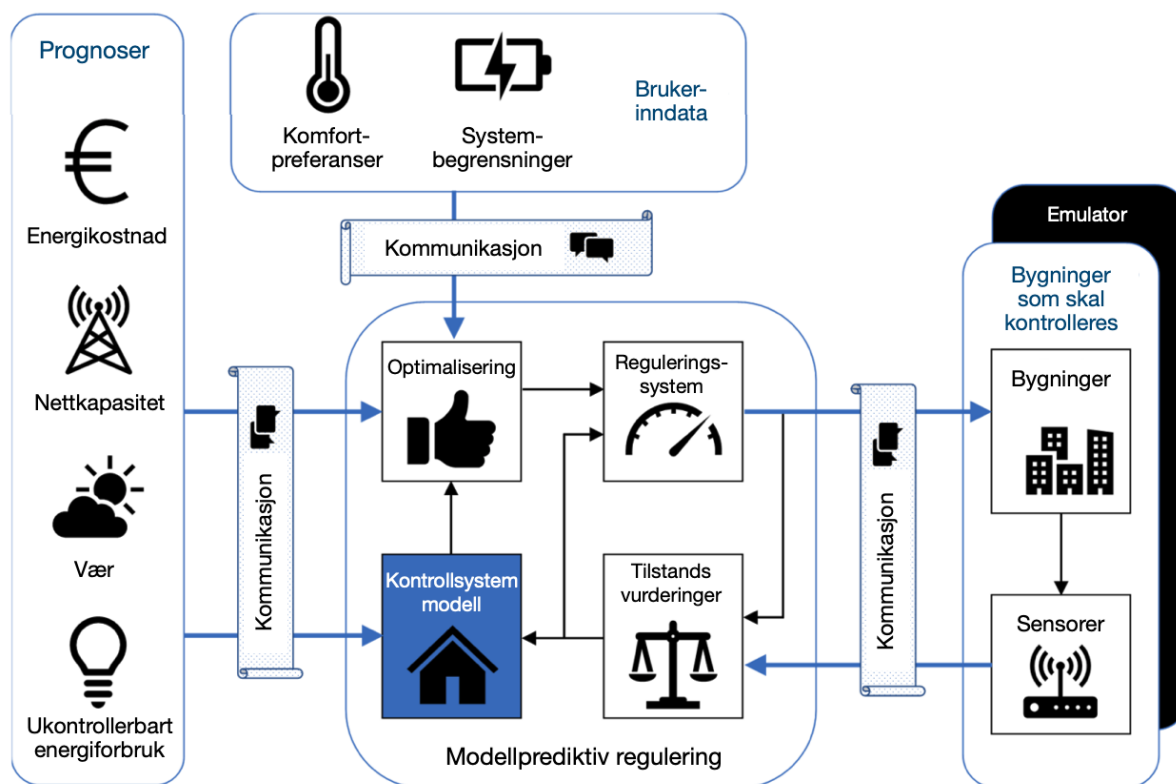
Batteri tilkoblet nettet vil kunne bidra til å jevne ut effekttoppene som vil ha direkte påvirkning på nettbelastningen. BESS bidrar også til å balansere produksjonsvariasjoner fra fornybare energikilder som vind- og solkraft. Uten lagring av energi, må kraftnettet benytte seg av mer import eller benytte reservekraftverk som gjerne er dyre i drift og mindre miljøvennlig. Energilagring og andre regulerbare kraftsystemer muliggjør også energi arbitrasje. Det bidrar både til økonomisk gevinst og et mer effektivt energisystem. I tillegg vil BESS kunne bidra med frekvens regulering på kraftnettet. Det er en ordning som kalles raske frekvensreserver (FFR), som aktiveres svært raskt under store feil på kraftnettet – for å hindre frekvensfall under 49,0 Hz [76, 89].



Figur 2.20: Tre fordeler med batteribasert energilagring i kraftsystemet. Figuren er oversatt til norsk fra original versjon [90].

2.5.4 Styringsalgoritmer

For å kunne bruke energi mest mulig kostnadseffektivt og bærekraftig vil en datamaskin være et godt verktøy. Figur 2.21 presenterer utnyttelse av fleksibilitetspotensial ved hjelp av modellprediktiv regulering (MPC). Slik styring er basert på en stor mengde eksterne signaler. Prognoser for blant annet strømkostnader, vær, energiforbruk og kraftproduksjon vil alle påvirke et gitt energisystem. Enten direkte som lokal solproduksjon, eller indirekte som høy strømpris. Videre vil MPC sørge for at komfortpreferanser og systembegrensinger blir ivaretatt, samtidig som sensorer og målere leverer data i sanntid. Data-drevet intelligent styring tar hensyn til de nevnte parametrene og gjør det mulig å optimalisere driften. Slik styring er med på å bestemme bruken av blant annet BESS i det totale energisystemet. Det finnes likevel utfordringer som ustabil kommunikasjon, ikke-fungerende enheter, samt mengden og kompleksiteten til data som må prosesseres. SINTEF ga i 2024 denne teknologien et TRL-nivå lik 5 [91, 92, 93].



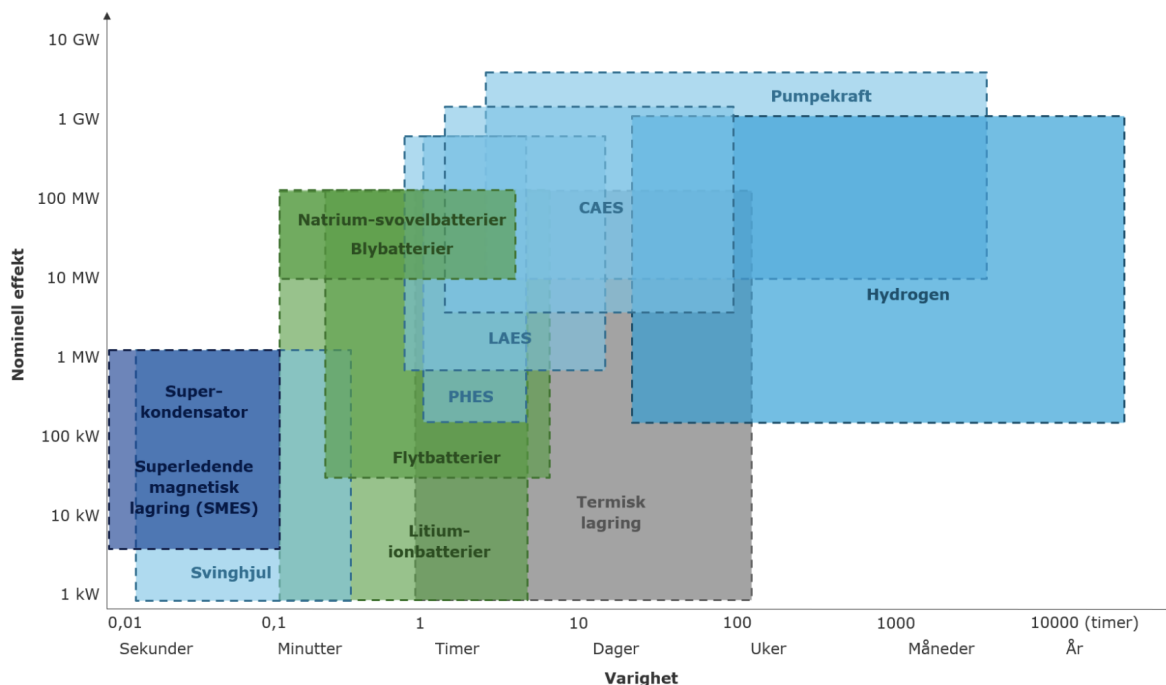
Figur 2.21: Styringsalgoritmer for optimalisert drift i bygg. Figuren er oversatt til norsk fra original versjon [93].

Modellprediktiv regulering baserer seg på prognoser, bruker-inndata og kommunikasjon med spesifikke bygninger som illustrert i Figur 2.21. Her presenteres optimalisering, reguleringssystemer og tilstandsvurderinger som tre elementer i modellprediktive regulering. Optimalisering innebærer å finne de beste metodene for å oppnå ønskede resultater, basert på prognoser og inndata fra brukere. Reguleringssystemer bruker videre denne informasjonen til å styre bygningens systemer, samtidig som tilstandsvurderingene overvåker sensorer og bygningens systemer for å kontrollere og vurdere kontrollsystemets drift. Pilene i figuren illustrerer hvordan elementene kommuniserer for å sammen utgjøre den totale kontrollsystemmodellen. Styringsalgoritmer for den spesifikke modellen kan anvendes i eksisterende bygninger eller i ulike smarte strømnnett.

2.5.5 Langtidslagring

Ifølge rapport utgitt av DNV i 2020 *Lagringsteknologier for fleksibilitet i energisystemet* forventes det økt forskning på langtidslagring av elektrisitet frem mot 2050. Denne utviklingen fremprovoseres av et økende behov for storskala lagring med en endring i bruksområde fra frekvensregulering til større lastflytting og arbitrasje. Den gjennomsnittlige varigheten på energilagringsteknologier knyttet til strømnettet er i dag omtrent 2 timer, og forventes å

øke til fire timer i takt med teknologisk utvikling. Tekniske egenskaper som spiller inn på lagringssystemer er nominell effekt, utladingstid, degradering over tid og virkningsgrad. Fysisk størrelse og vekt har ikke så stor betydning for stasjonære lagringssystemer. Figur 2.22 illustrerer ulike lagringsteknologier i henhold til nominell effekt og varighet [73].



Figur 2.22: Varighet og nominell effekt for ulike lagringsteknologier [73].

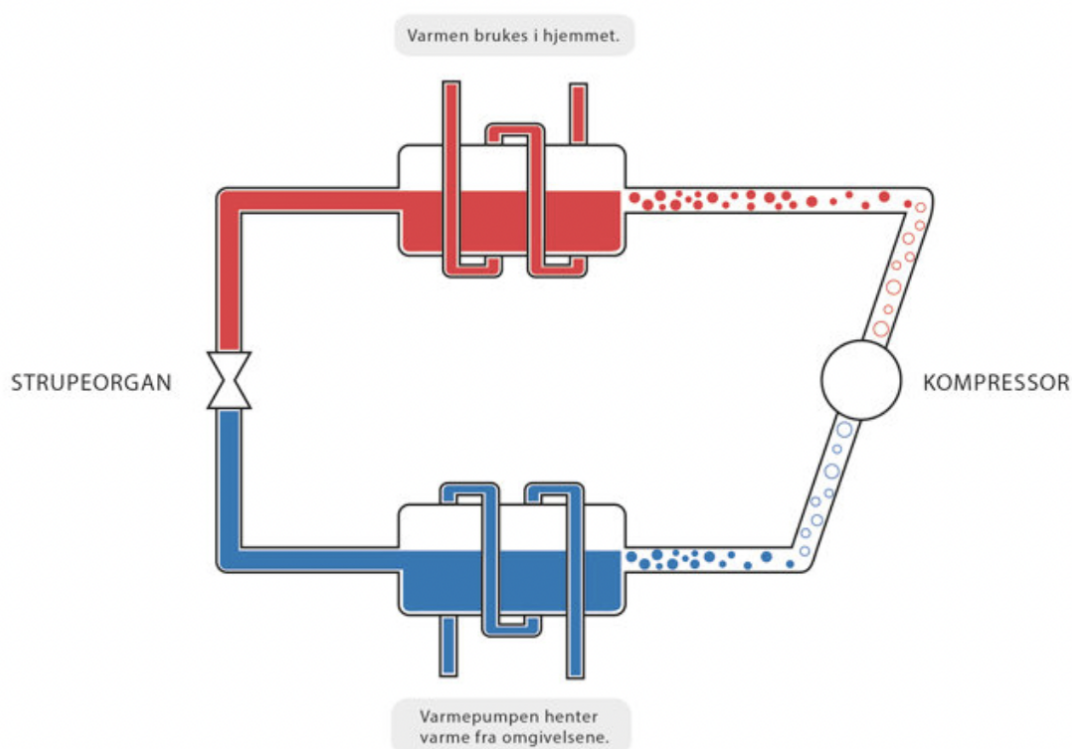
Slik figuren illustrerer er pumpekraftverk og hydrogen teknologier som egner seg godt for langtidslagring med høy nominell effekt. Fordelen med pumpekraftverk og hydrogenlagring er at de har kort responstid og lang utladingstid med en god effektivitet. Ulempene med slike lagringsteknologier er geografisk begrensning og at det krever store naturinngrep. Hydrogen er i tillegg spesielt brannfarlig. Langtidslagring egner seg godt når det er ukes- eller månedsvariasjoner i kraftproduksjon. Slike systemer kjennetegnes av høy kapasitet, lang utladingstid og har syklusfrekvens hver uke eller sjeldnere [73].

2.6 Varmepumper

Varmepumper (VP) har de siste årene blitt mer attraktivt å anskaffe til privatboliger. Teknologien er blitt mer tilgjengelig, samt rimeligere. En VP utnytter energi som allerede finnes i et område for å benytte den i et annet område. En VP er både klima- og miljøvennlig, ettersom den er energieffektiv og kan erstatte anlegg som bruker fossile energikilder. I løpet av driftsfasen til en VP er det ikke tilknyttet utslipp av klimagasser. Varmeprosessen drives av elektrisk energi. Varmefaktor, også betegnet som COP-faktor, definerer hvor effektivt varme produseres. Eksempelvis vil en VP med COP-faktor lik 3 kunne bruke 1 kWh elektrisk energi til å få

omdannet 3 kWh varmeenergi. Høyere COP-faktor vil tilsvare et mer effektivt system og medføre større besparelse. Jo større differanse mellom temperaturen på varmekilden og temperaturen som VP leverer er, desto høyere vil COP-faktoren være [94, 95].

VP består hovedsakelig av fire komponenter; kompressor, kondensator, strupeventil og en fordamper som er illustrert i Figur 2.23. Arbeidsmediet som sirkulerer i det lukkede systemet opplever tilstandsendringer i form av gass og flytende form, og kan dermed ta opp eller gi fra seg varme. En VP i Norge benyttes hovedsaklig til oppvarming, syklusen kan derimot reverseres for å levere kjøling etter behov. Oppvarmingssyklusen henter energi fra området utenfra som videre går gjennom en fordamper. I fordamperen har arbeidsmediet lavere temperatur enn varmeenergien som hentes inn. Varmeenergien fortsetter som gassform før den når kompressoren, hvor trykket og temperaturen økes ved hjelp av elektrisk energi. Deretter går den varme gassen gjennom en kondensator og varm temperatur overføres til inneluft, tappevann eller vannbåren varme. Etterhvert som varmen avgis vil gassen kondensere tilbake til flytende form som deretter går videre til et strupeventil. Her ekspanderes gassen samtidig som trykket og temperaturen reduseres og prosessen kan gjentas [96, 97].



Figur 2.23: Illustrasjon av fire hovedkomponenter i en varmepumpe; kompressor, kondensator, strupeventil og fordamper [97].

Det finnes ulike typer VP; avtrekksvarmepumpe (AVP), luft-til-luft varmepumpe (LTLVP), luft-til-væske varmepumpe (LTVVP) og væske-til-væske varmepumpe (VTVVP). De ulike typene

varierer i effekt og pris, der effekten ligger mellom 30 - 50 %. De har en levetid mellom 12-15 år, med unntak av VTVVP som har en levetid på 20 år. En AVP henter varme fra ventilasjonsluft og avgir den til romoppvarming, varmtvann eller til forvarming av frisk uteluft.

Den vanligste typen VP i Norge er LTLVP. Den henter varme fra uteluften og frigir varm luft inne i boligen. En LTLVP kan hente varme fra uteluft helt ned i $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ og fungerer godt for boliger med åpen planløsning. I tillegg er LTLVP det rimeligste alternativet og egner seg for boliger med et årlig energiforbruk på omtrent 15 000 kWh. En LTVVP henter varme fra uteluft og bruker den til å varme opp vannet til radiatorer, vannbåren gulvvarme eller ved forvarming av tappevannet. En LTVVP er mer kostbar enn en LTLVP og egner seg bedre for en bolig med et høyere energiforbruk, omtrent 25 000 kWh/år. En VTVVP, også kalt berg-, jord- eller sjøvarmepumper, henter energi som er lagret i fjell, jord eller sjø. Den varmer også opp vann til radiatorer eller et vannbårent system. Denne er egnet for boliger med et årlig energiforbruk på nærmere 30 000 kWh eller mer, og er mer kostbart å investere i enn LTLVP og LTVVP. Derfor gir Enova 25 % støtte inntill et maksimalt støttebeløp lik 10 000 NOK ved investering i en VTVVP [98, 99, 100, 101].

2.7 Termisk energilagring

Termisk energibehov står for omtrent halvparten av verdens energibehov. For å redusere avhengigheten av fossile brensler og fremme bærekraftig energiproduksjon, bør termisk energi i større grad bli fornybar. Utvikling av termisk energilagring bidrar til lavere energiforbruk, redusert utslipp og kostnadseffektiv lagring [102].

2.7.1 Akkumulatortank

Akkumulatortank er en godt isolert tank fylt med varmt vann, og har relativt lite varmetap over en viss periode. En akkumulatortank kan fungere som et *sekundærbatteri* der varmt vann lagres til senere bruk. Det vil også kunne bidra fordelaktig til reduksjon av strømpriser og utjevning av effekttopper. Installasjon av en akkumulatortank egner seg godt for boliger med varmepumper, biokjel og/eller vannbåren gulvvarme, samt til en husholdning med høyt forbruk av varmt vann [103].

2.7.2 Fjernvarme og fjernkjøling

Et fjernvarmeanlegg er et system som utnytter overskuddsenergi til å forsyne bygg eller områder med energi til oppvarming og tappevann. Anlegget er et vannbårent system som ofte benytter biobrensel, spillvarme fra avfallsforbrenning eller industri, for å levere varme til eksterne kunder. Fjernvarmesystemet sikrer fleksibilitet til nettet, ettersom det muliggjør bruk av flere ulike

energikilder. Avfallsforbrenning brukes gjerne som grunnlast når effektbehovet er normalt. Fjernvarmeanlegg vil i tillegg ha minst én annen energikilde tilgjengelig som spisslast, som benyttes ved større effektbehov i nettet. I norske fjernvarmeanlegg benyttes fossil olje og gass kun om det er strengt nødvendig. Mindre varmetap vil føre til mer bærekraftige fjernvarmeanlegg, som deretter reduserer bruken av fossil olje og gass i bygg. Fjernvarmesystemet benytter seg av energi som ellers ville gått til spille. Det reduserer bruken av fossile oppvarmingskilder i bygg, bidrar til sirkulærøkonomi og minsker klimagassutslipp. Et fjernkjølesystem fungerer på lik måte som et fjernvarmesystem, men med kaldt vann fra sjøvann, elver eller grunnvann. Kjøling kan slik leveres gjennom et fjernkjølenettverk eller gjennom lokale løsninger installert i bygg. Slik teknologi er veldig energieffektivt ettersom den eneste energibruken er knyttet til pumpesystemet [104, 105, 106].

I Trondheim er fjernvarmesystemet hovedsaklig basert på forbrenningsanlegget på Heimdal og det har vært i drift siden 1982. Fjernvarmesystemet i Trondheim dekker 30 % av det totale oppvarmingsbehovet til byen. Det benyttes hovedsaklig restavfall til å varme opp vannet i fjernvarmeanlegget og det er avfall som kommer fra hele Midt-Norge. For å sikre forsyningen av fjernvarme er det etablert understasjoner i byen; på Dragvoll, Marienborg, Nidarvoll, Lilleby, Øya, Brattøra, Midtbyen, Ladehammeren og Heggstadmoen [107].

2.7.3 Sesongvarmelager

Et sesongvarmelager er et system som lagrer varme i berggrunnen frem til det er behov for energien. Varmelager bidrar til samspill mellom elektrisk og termisk energiforsyning og vil kunne avlaste både strømmettet og fjernvarmenettet når effekten er størst. Et varmelager vil kunne lagre energi over flere måneder og krever samtidig god planlegging og strategisk plassering. Effektiviteten til et sesongvarmelager er avhengig av berggrunnens egenskaper og områdets geologi, deriblant termisk varmekapasitet og varmeledningsevne. Det finnes to typer bergvarmevekslere, u-rør og koaksial. U-rør består av en rørkrets hvor nedgående og oppgående strømninger veksler varme med berggrunnen. Slike brønner krever fyllmasse for å kunne øke varmeledningsevnen. Koaksial brønner består av to koaksiale rør der enten nedgående eller oppgående strømning veksler varme med berggrunnen. I denne teknologien vil strømningene reverseres ettersom varmelageret oppvarmes eller gir fra seg varme. Det er ønskelig å oppnå lav termisk motstand mot berggrunnen og høyest mulig termisk motstand mellom strømningene. To sesongvarmelagre som er i drift i dag er blant annet geotermos i Drammen og fotballbanen til Kolbotn idrettslag [20, 108, 109].

2.7.4 Faseendringsmateriale

Faseendringsmateriale (PCM) muliggjør lagring av overskuddsenergi for å kunne benytte seg av det når det er behov. Det er materialer som kan gå fra fast form til flytende form innenfor et gitt temperaturområde eller regulerbare forhold [110].

I ZEB-laboratoriet til SINTEF og NTNU lagres overskuddsenergi fra solceller i en stor boks som inneholder PCM. I ZEB-Laboratoriet benyttes biovoks som ved 37 °C går over fra fastkrystallinende form til flytende form. Strukturen til materialet gjør at molekylene sitter tett sammen ved fast form og bevarer energi. Når materialet smeltes, absorberes varme. Da løser bindingene seg og molekylene bruker kinetisk energi til å bevege seg. Kort fortalt blir PCM flytende ved opplading, og fast form ved utladning. PCM er en god oppvarmingsmulighet og fungerer godt for *peak shaving*. Den har derimot høye investeringskostnader ettersom teknologien er relativt ny. IEA ga i 2023 PCM et TRL-nivå 7, som på deres skala betyr at teknologien har nådd fungerende prototype i gitte bruksområder. Teknologien er fremdeles i utviklingsfasen, men er kommersielt tilgjengelig for enkelte materialer og driftstemperaturer. PCM er en løsning som kan egne seg for industri, næringer og boligbygg [73, 111, 112].

2.8 Miljøpåvirkning

Bygninger i Norge har betydelig lavere direkte klimagassutslipp enn resterende land i Europa. Dette kommer av Norges fornybare kraftproduksjon. Det kreves tiltak for å forbedre den sirkulære økonomien og økt oppmerksomhet på bærekraftig verdikjede.

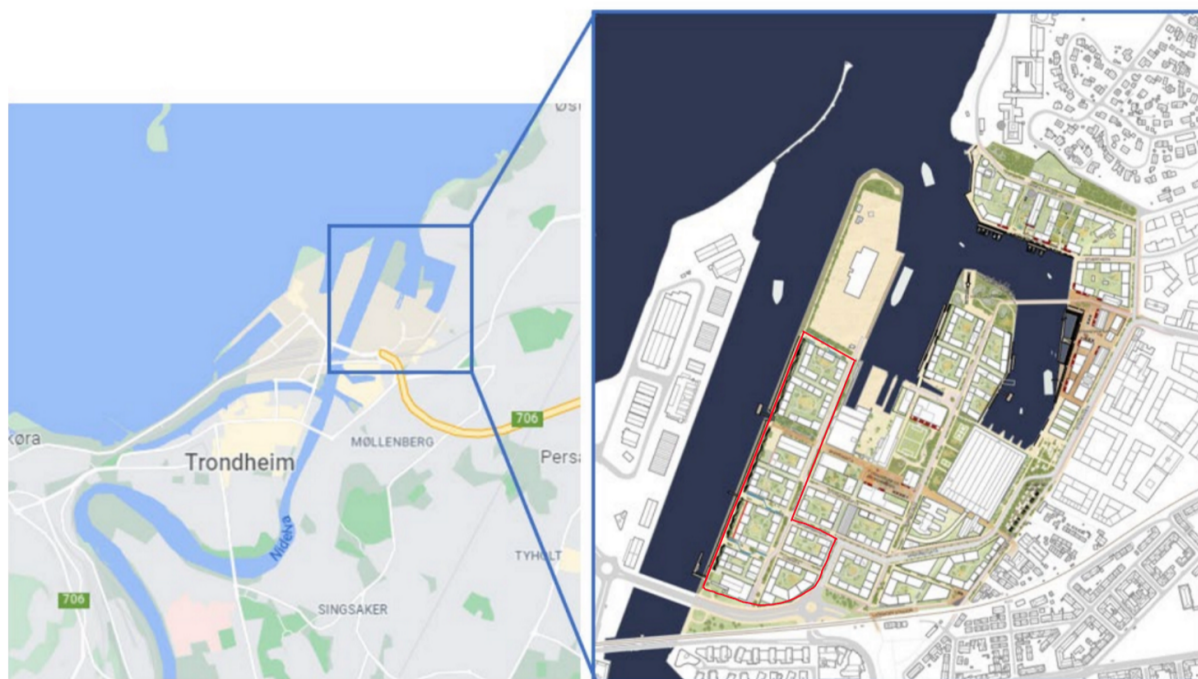
Teknologi og generell bruk av solceller er i stadig utvikling, hvor Norge har sterke forsknings- og kompetansemiljø som samarbeider godt. Energiproduksjon fra sola har stort potensial, og produksjon av elektrisitet fra solcellepanel har i seg selv ingen direkte utslipp i driftsfasen. Likevel knyttes det utslipp og miljøproblemer til særlig produksjonsfasen. For å oppnå høy effektivitet i solcellen må halvleder materialet, som oftest er silisium – være ekstremt rent. Renseprosessen som fjerner urenheter fra naturlig silisium har biprodukter som må deponeres. Kina har blant annet reguleringer som sørger for å resirkulere store deler av disse biproduktene. I tillegg er silisiumproduksjon særlig energiintensiv i seg selv, og energimiksen som brukes har derfor mye å si på hvor miljøvennlig et solpanel blir. SINTEF og Forskningscenteret for bærekraftig solcelleteknologi (FME SuSolTech) peker på at norskprodusert silisium er verdens mest miljøvennlige. De anslår at CO₂-utslippet for silisiumproduksjonen vil reduseres med 96 % – når norsk energimiks brukes i beregningen. Uavhengig om det er norsk eller kinesisk produserte solcellepanel – har begge uansett mye lavere fotavtrykk på klima og miljø enn det for eksempel strøm fra et kullkraftverk har [113, 114].

Det grønne skiftet og Norges høye forbruk av elektrisitet krever strengere krav for produksjon, bruk og resirkulering av batterier. I mars 2024 inngikk Norge og EU avtale om grønt strategisk industripartnerskap som en del av *Grønn allianse*. Denne avtalen skal styrke samarbeidet om bærekraftige verdikjeder for batterier og landbaserte råvarer. Det globale grønne skiftet er avhengig av samarbeid og deling av ressurser. Norge har de siste årene inngått flere grønne industripartnerskap med blant annet Tyskland, Frankrike og Japan. Regjeringen publiserte i april 2024 at Norge og USA har blitt enige om å starte forhandlinger om strategisk mineralsamarbeid, som er positivt for den globale klimautviklingen. Industripartnerskapet gjør at Norge får ta del i ministermøtene i *Den europeiske batterialliansen* [115, 116].

Batterier er en sentral teknologi for den grønne omstillingen med en økende etterspørsel. EU-parlamentet vedtok i 2023 en batteriforordning som del av EUs grønne vekststrategi. Dette regelverket omfatter hele verdikjeden for et batteri, fra produksjon til ombruk, materialgjenvinning og resirkulering av batterier. Regelverket vil føre frem mer bærekraftige og sikrere batterier som er positivt for både industri og forbruker. Batteriforordningen stiller strenge krav til batterienes ytelse og sikkerhet som vil bidra til redusert risiko for brann. Strengere restriksjoner for bruk av farlige kjemikalier og redusert miljøbelastning for utvinning av mineraler vil bidra til bedre vilkår for arbeiderne. Denne ordningen medfører at produsenter som vil selge batterier til EØS-land må følge dette regelverket. Krav om merking av klimabelastning og minst mulig klimafotavtrykk fra produksjon vil føre til et mer bærekraftig marked for batteriene. Det nye reglementet vil øke levetiden til batteriene og gjøre det mulig for forbruker selv og bytte batterier der det er mulig. Åpenhet og tilgjengelig informasjon vil øke forbrukernes bevisstgjøring rundt miljøpåvirkningen til batterier. Økt bevissthet vil i tillegg fremme resirkulering og bærekraftig forbruk. Livssyklusberegninger for energilagringsteknologier er et marked som bærer preg av flere ulike metoder og ulike systemgrenser. Dette er en årsak til at det er vanskelig å sammenligne utslipp for ulike energilagringssystemer [73, 117, 118, 119, 120].

2.9 Nyhavna - utviklingen mot en nullutslippsbydel

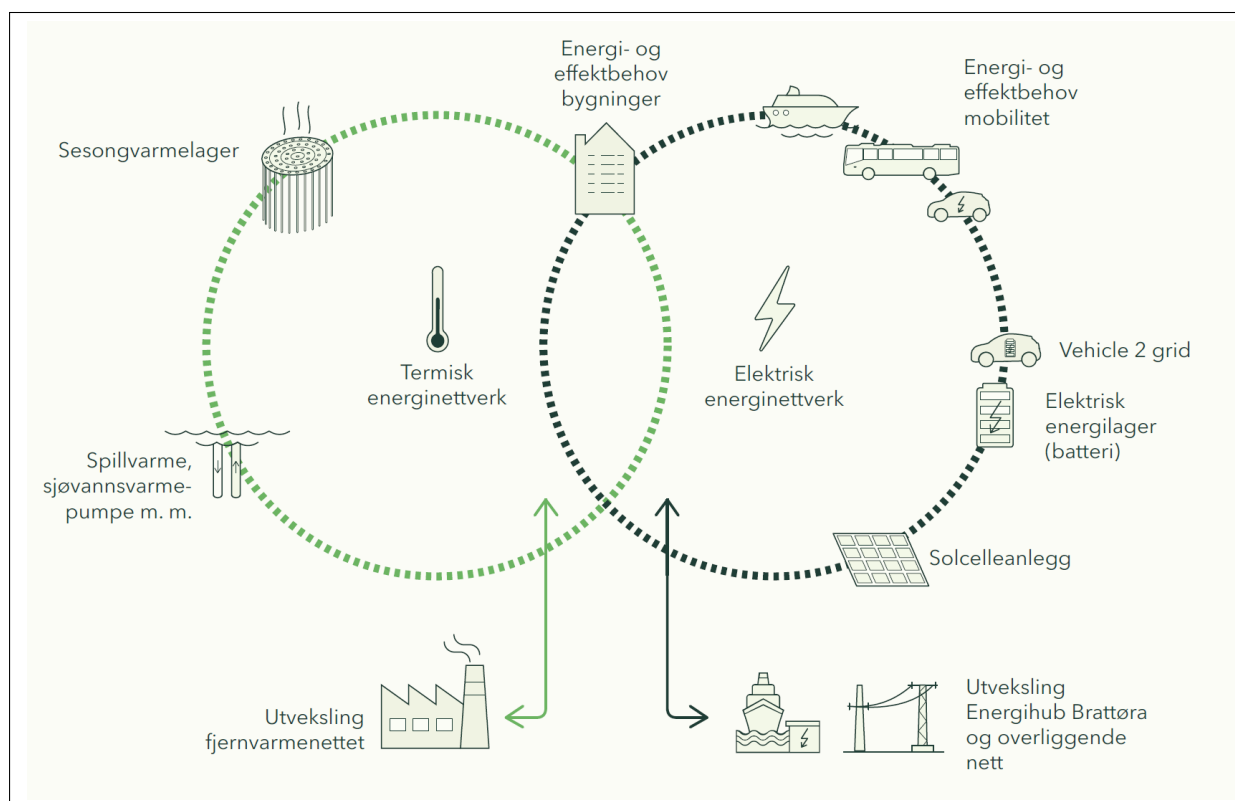
Nyhavna er en bydel som ligger i Trondheim som skal utvikle seg fra å være et industriområde til å bli en bærekraftig sentrumsbydel. Frem til nå har Nyhavna stort sett bestått av industribygninger og havnedrift. Figur 2.24 illustrerer området Nyhavna, der Transittkaia er markert med rød ramme [121].



Figur 2.24: Oversiktsbilde over Nyhavna i Trondheim med Transittkaia markert med rød ramme til høyre i forhold til Trondheim sentrum [121].

Utviklingen av Nyhavna mot et nullutslippsområde ble vedtatt i 2019 av Trondheim kommune og kommer til å foregå over en lengre periode. Som et nullutslippsområde skal ikke utbyggingen av Nyhavna gi økt energibehov, effektbehov eller klimagassutslipp på bynivå. Dette betyr at Nyhavna trenger løsninger tilpasset energi, effekt og klima som fungerer i samspill med områder rundt. Nyhavna publiserte i 2021 en sluttrapport for utviklingen av området som er antageligvis vil foregå over flere tiår. I denne rapporten refereres det til *Nyhavna anno 2040* med nøkkeltallene; 340 000 m² totalt areal fordelt 60/40 på boligbygg og næring, samt et forhold på 7,5 nybygg over bevarte bygninger [121].

Konseptutredningen for Nyhavna har tatt utgangspunkt i kriterier for nullutslippsområder definert av FME ZEN. Energisystemet på Nyhavna planlegges dimensjonert for elektrisk drevet kollektivtrafikk, smart lading samtidig som det dimensjoneres for en begrenset bilpark. Teknologier som er utredet for energisystemet på Nyhavna er vist i Figur 2.25. Det planlegges med lokal strømproduksjon fra solceller, batterier for lagring og balansering av effekt, samt sesongvarmelager for lagring av overskuddsvarme om sommeren. Overskuddsproduksjon av både elektrisitet og varme planlegges å bli lagret eller distribuert videre ut over Nyhavnas systemgrense. Helhetsplanen for Nyhavna tilsier at det skal benyttes noe gjenbruk av fundament og ombruk av deler av fasader. I tillegg vil det være fokus på godt isolerte konstruksjoner for å redusere varmetap og energibehov. For å kompensere utslipp i et livsløpsperspektiv for utbyggingen av Nyhavna krever det stor produksjon av lokal strøm [121].



Figur 2.25: Oversikt over energisystemer som er planlagt på Nyhavna etter konseptutredningen [121].

For å planlegge og sette ambisjonsnivå for utviklingen av Nyhavna har det blitt etablert et kvalitetsprogram i samarbeid mellom Trondheim kommune og Trondheim havn. Dette programmet er et rammeverk som inneholder ti virkemidler som fungerer som overordnede mål for områdeutviklingen. Virkemiddel seks er sentralt for energi og bygninger som ordrettsier; *Bygge en nullutslippsbydel med bærekraftig ressursbruk*. Dette virkemidlet inneholder flere delmål hvor blant annet punkt 6.1 og 6.3 er som følger:

6.1 *Hovedmål nullutslipp: Området og fremtidig aktivitet skal utvikles som et nullutslippsområde*

6.3 *Hovedmål energi: Områdeutviklingen og fremtidig aktivitet skal ikke føre til økt energibehov, effektbehov eller klimagassutslipp på bynivå*

Disse punktene inkluderer at bygningene skal tilfredstille kravene for ZEB-COM eller bedre og felles termisk og elektrisk energisystem for området. Underpunktet 6.3.2 tilsier at alle bygninger skal sette av plass til energilager for å oppnå effektutjevning. I tillegg er det et stort fokus på solenergi for området og punkt 6.3.3 tilsier at det skal tilrettelegges for solceller på aktuelle tak og at utforming på fasader må tilrettelegges med tanke på solforhold for området [49].

For utbyggingen av Nyhavna er det skrevet flere rapporter for planlegging og utarbeidelse av området, samt miljøplan. Denne oppgaven tar for seg Transittkaia som område og det vil dermed

bli benyttet et utvalg av informasjon fra allerede utarbeidede rapporter for området. Rapporter som beskrives nærmere i dette kapitlet er blant annet publisert av Nyhavna utvikling AS og SINTEF.

2.9.1 Transittkaia - første delområde ut

Den planlagte utviklingen er blitt delt inn i ulike delområder hvor Transittkaia vil være første prosjektet som igangsettes på Nyhavna. Arkitektkontoret *tema Cobe* ble vinner av arkitektkonkurransen for Transittkaia med forslaget *Ny Havna - Nye horisonter*. Arkitektløsningen viser til et område som tilsvarer en fjerdedel av Nyhavnas totale areal. Arkitekttegningene planlegger med å kombinere ulike typologier i samme kvartal. I tillegg vil det være et fokus på sambruk mellom bygninger hvor *bokal* er et konsept som kombinerer bolig og virksomhet. Tabell 2.4 presenterer bruksareal (BRA) benyttet for leiligheter, kontor, butikk, hotell, barnehage, annet og totalt BRA [122, 121].

Tabell 2.4: Anslått BRA for Transittkaia.

Leilighet	Kontor	Butikk	Hotell	Barnehage	Annet	Totalt
71 820 m ²	19 725 m ²	3 046 m ²	3 046 m ²	3 046 m ²	4 146 m ²	104 829 m²

Områdeoversikt utgitt av *team Cobe* illustrert i Vedlegg E illustrerer at det planlegges både studentboliger, boliger, virksomhet og uteareal på Transittkaia. Områdene er navngitt henholdsvis 1, 2, 3.0, 3.1, DIII og M.H. som er ulike områder som planlegges på Transittkaia. Arkitektteamet *Cobe* har anbefalt et bruttoareal (BTA) på 108 500 m² for hele Transittkaia. Dette er anbefalt på bakgrunn av analyser som vurderer bokvalitet, kombinasjon av boliger og næringer, samt sol-, skygge- og vindforhold [122].

2.9.2 Sjøvarmepumpe og fjernvarmenett

For bygninger og næringsvirksomheter på Nyhavna kan det bli nødvendig med løsninger for fjernkjøling og utvikling av tilhørende infrastruktur. I 2021 gjorde Statkraft Varme en vurdering der de undersøkte muligheten for å installere en sjøvannsvarmepumpe som skal levere varme til fjernvarmenettverket i Trondheim. Statkraft Varme undersøkte flere mulige lokasjoner i nærheten av både sjøvann og allerede utbygd fjernvarmenett. Statkraft Varme estimerte behovet for VP til 15 MW installert effekt. Deretter ble en mulig realisering av prosjektet skissert av Statkraft Varme og Tensio. Tidsperspektivet for ferdigstillelse er estimert til 10 år. Sluttrapporten har tatt utgangspunkt i en årsvarmefaktor (SCOP) fra Oslofjord varme i 2019, der sjøvannsvarmepumpen i området hadde er SCOP på 4 [19, 121].

2.9.3 Sesongvarmelager

Et borehullsbasert sesongvarmelagerm på Nyhavna vil kunne lagre overskuddsvarme fra andre energikilder som ellers vil gå tapt. Dette inkluderer overskuddsvarme fra fjernvarmenettverket og vil være tilstrekkelig til å dekke tilnærmet hele varmebehovet på Nyhavna. Geotermosen har en høy nok temperatur til å levere varmen som *frivarmer* til omgivelser rundt. I sluttrapporten for Nyhavna fra 2021 er det beregnet et totalt varmebehov på 14,7 GWh/år og en varmeeffekt på 5 MW. Med omtrent 250 brønner vil sesongvarmelageret dekke tilnærmet hele varmebehovet. Et slikt lager vil kunne levere varme med temperatur mellom 40 - 60 °C ved å sirkulere det ut i distribusjonsnett. På vinteren kan temperaturen økes ytterligere ved hjelp av VP. Investeringskostnad for 250 borehull vil koste rundt 25 MNOK [121].

Det er også vurdert å øke sesongvarmelageret fra 250 brønner til å ha 400-500 brønner og samtidig kombinere det med en sjøvannvarmepumpe. Et slikt system vil kunne levere all varme som trengs til hele Nyhavna, og samtidig klare å levere overskuddsvarmen til fjernvarmenettet. Dette tilsvarer en overskuddsvarme på 33,3 - 37,5 GWh/år og 9,4 - 10,6 MW som leveres til fjernvarmenettet. Nyhavnas geotermos vil da kunne bidra til å varme opp en større del av byen, og vil på de kaldeste dagene bidra til at også fornybarandelen økes ved å erstatte fossile spisslaster. Ytterligere borehull vil øke kostandene til mellom 40 - 50 MNOK [121].

2.10 Lignende energisystem

FME ZEN er i planleggingsfasen for ni pilotprosjekter som skal være testområder for å redusere klimautslipp og muligheten for å oppnå et nullutslippsområde. Pilotprosjektene er Campus i Evenstad, Furuset i Oslo, Zero Village i Bergen, Knowledge Axis med NTNU Campus, Sluppen i Trondheim, Ydalir i Elverum, Airport re-development i Bodø, Mære agricultural school i Steinkjær og Fornebu i Bærum. Områdene har fokus på å redusere energiforbruket og øke energiproduksjonen fra fornybare energikilder. I tillegg gir pilotprosjektene mulighet for å erfare, utvikle og videreformidle kunnskap, ettersom prosjektene dekker ulike problemstillinger [123].

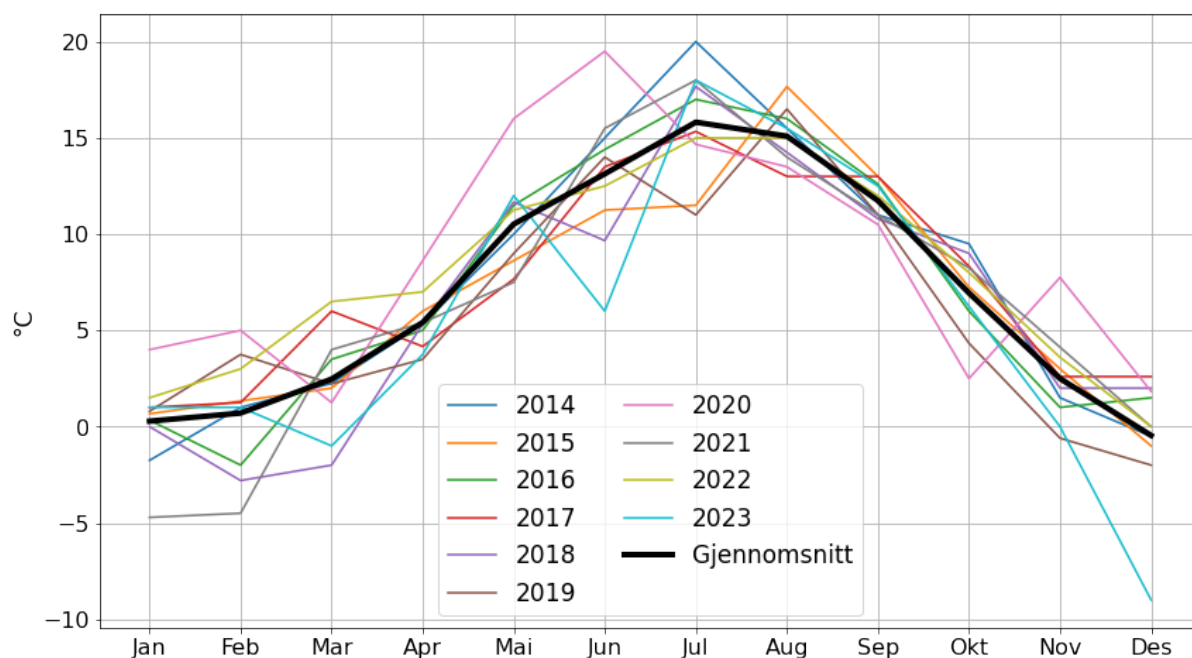
Pilotprosjektet NTNU Campus i Trondheim har ambisjoner om å bli et pluss-campus, som vil si at det skal produsere mer energi enn det som forbrukes. Prosjektet har sett på hvor mye det er mulig å redusere energiforbruket, andelen egenprodusert energi, samt muligheten for å lagre overskuddsenergi. Nye bygg skal kvalifiseres for ZEB, i tillegg til at ZEN-området skal ha krav om ZEB-COM, der energiproduksjon og CO₂ kompensasjon er viktige faktorer. I dette prosjektet er det planlagt å bygge innenfor et areal på 129 100 m² og skal ferdigstilles innen 2028 [124].

Ydalir i Elverum er et ZEN pilotprosjekt der det skal bygges 1 000 nye boliger på omtrent 100

000 m², i tillegg til ny barnehage og ny skole. Prosjektet har en totalstørrelse lik 430 000 m² og fokuserer på ZEN-kriterier som naturgassutslipp, energi, kraft, mobilitet, økonomi, romslige områder og innovasjon. Prosjektet startet i september 2020 og planlegger å være ferdig innen 2030. Her ble en ny skole og ny barnehage ferdigstilt i 2023. Dette er et av pilotprosjektene som har kommet lengst i planlegging og utførelse. Artikkel fra *ZEN Research Centre* som omhandler ZEN og dens lovverk, informerer om hva slags muligheter og restriksjoner som finnes i utviklingen av et ZEN område. Samarbeidspartnere på pilotprosjektet Ydalir, Elverum Vekst og Elverum kommune, har møtt utfordringer knyttet til at lovverket ikke er tilpasset samfunnets overgang til å bli et nullutslippssamfunn. En av hovedutfordringene oppstår når grunneiere i samme område ikke ønsker å slutte seg til samme krav [125, 126].

2.11 Klima i Trondheim

Trondheim bærer preg av nordisk og variert klima. Geografisk plassering langs norskekysten skaper store variasjoner i værforhold. Fra år 1900 frem til i dag har temperaturutviklingen blitt varmere. I 2023 hadde Trondheim en middeltemperatur på 6 °C. Vinterhalvåret bærer preg av mildere temperaturer med en gjennomsnittstemperatur på -2 °C. Sommerhalvåret har i gjennomsnitt en temperatur på 11 °C. Figur 2.26 presenterer gjennomsnittlig temperatur i Trondheim de siste 10 årene [127].



Figur 2.26: Temperaturmålinger fra værstasjon ved Lade i Trondheim, i tidsrommet 2014 til 2023 i tillegg til en gjennomsnitt.

Temperaturforhold varierer med vindretning, der det i sommermånedene vil være høyere temperatur fra himmelretningene sør og øst. Det vil derimot være kaldere temperatur dersom

vinden kommer fra nordvest eller sørvest retning. Den årlige middelvinden i Trondheim er lik 4 m/s, som tilsvarer lett bris. Om vinteren er middelvinden 4,6 m/s og om sommeren er den lik 2,7 m/s. Trondheim har i gjennomsnitt 200 nedbørsdager i året, som inkluderer både regn og snø. Generelt har Trondheim fått mer nedbør med årene og hadde i 2022 en årlig nedbørsmengde på 944 mm registrert på Lade værstasjon. Soltimene om sommeren er i gjennomsnitt lik 18 timer og omtrent 5 soltimer i snitt om vinteren [127].

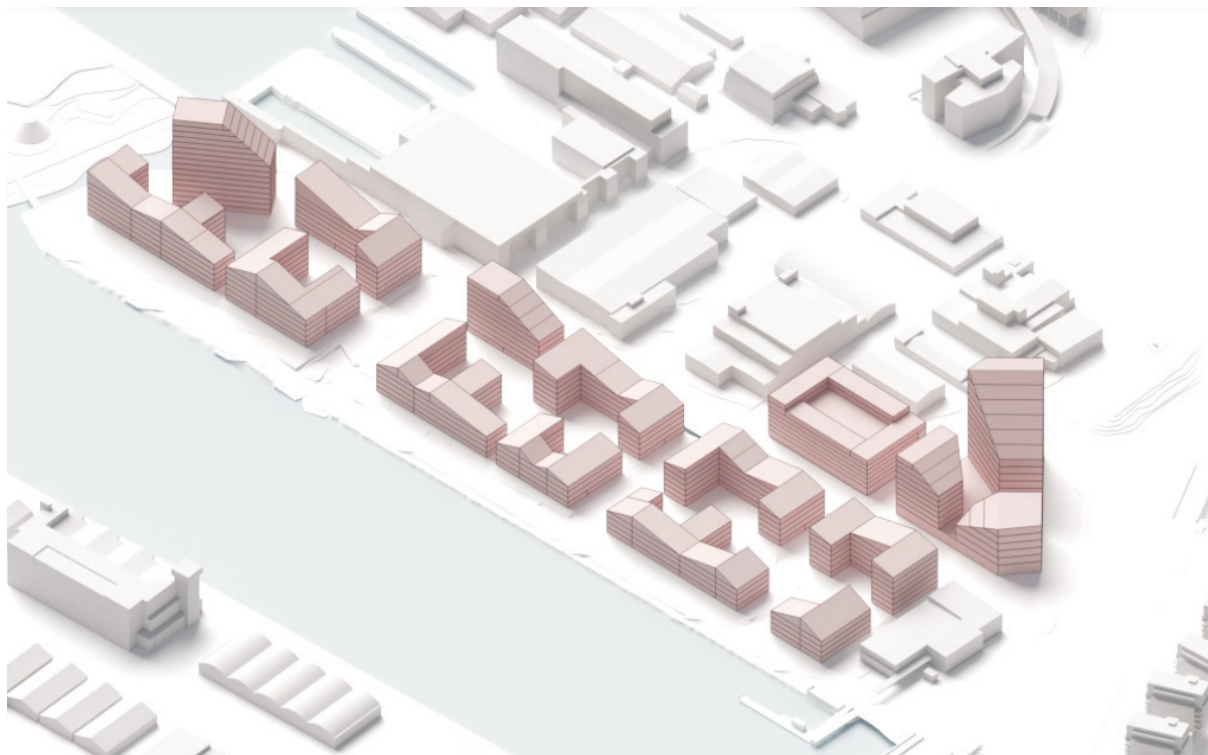
3 Metode

For å finne hvilke tiltak som bidrar til Transittkaia som del av en nullutslippsbydel er det blitt benyttet analytisk metode for å se på utvalgte tiltak samt kombinasjoner av disse. Fra konseptutredningen av energisystemer tiltenkt på Nyhavna er det solcellepanel, reduksjon i energi- og effektbehov for bygninger, lagring av elektrisitet og varme som har blitt tatt hensyn til. Beregningene er gjort for solproduksjon og lagring av elektrisitet med fokus på å dekke elektrisitetsbehov for området.

Denne oppgaven fokuserer på de tre første punktene for ZEN som har direkte konsekvens for energi og utslipp i forhold til bygninger, referert til i Kapittel 2.3.7. Dette innebærer planlegging og muligheten for å oppnå et netto nullutslippsområde, energieffektivitet, fornybar energiproduksjon og lagring, samt fleksibiliteten for energisystemer. Nøkkellindikatorene som er relevant for rapporten er energibruk og energibehov i bygninger, lastprofiler og energibelastning for kraftnettet.

3.1 Referansesystem

Transittkaia er satt som referansesystem for analysen. Figur 3.1 illustrerer en grov tredimensjonal skisse av planlagte bygninger illustrert i rødt, illustrert av arkitektfirma *Team Cobe*.



Figur 3.1: Arkitektskisse over Transittkaia skissert som røde bygninger med illustrativt anslag på høyder for bygningene [122].

3.2 Antagelser

For å avgrense oppgavens omfang har det blitt benyttet antagelser for beregningene. Antagelsene har gruppen ansett som relevant og hensiktsmessig, og har blitt avklart i samråd med intern veileder.

Gruppen har valgt å begrense analysen til å kun inkludere elektrisitetsbehovet for Transittkaia. Gruppen mottok et excel-ark fra bærekraftsrådgiveren til Nyhavna Utvikling med relevant data for områdets elektrisitets- og varmebehov. Dette elektrisitetsbehovet danner grunnlaget for videre beregninger i prosjektet. Transittkaia antas å være 25 % av totalt areal på Nyhavna. For bygningene i referansesystemet antas det høy isolasjons-standard og minimale varmetap. Det antas at sesongvarmelageret dekker hele det termiske energibehovet.

Denne oppgaven tar som nevnt utgangspunkt i et prosjekt som allerede er planlagt. Det vil dermed være naturlig å benytte antagelser fra Nyhavnas sluttrapport som er dannet for dette området. Tall som er blitt benyttet som antagelser er hentet direkte fra sluttrapporten, der det antas et forhold på bolig og næring lik 60/40. Oppgaven tar utgangspunkt i PV-scenario 2 fra sluttrapporten. Dette scenariet skal oppnå en tilpasset bygningskropp som muliggjør god utnyttelse av solenergi. Fra dette scenariet skal 50 % av takarealet og solfylte fasader på Nyhavna dekkes med solcellepanel. Dette utgjør et takareal på 55 000 m² og areal på utnyttede fasader på 44 000 m². For Transittkaia vil dette tilsvare et takareal avrundet til 14 000 m² og et fasadeareal lik 11 000 m². Videre antagelser for solproduksjon og lagring av elektrisitet i batterier spesifiseres videre der det gjelder.

3.3 Datainnhenting og programvare

Beregninger i denne oppgaven har i hovedsak blitt gjort gjennom programmeringspråket Python. Samme verktøy har også blitt benyttet for å illustrere relevante resultater, ved hjelp av i hovedsak to ulike bibliotek. *Matplotlib* som er et plotte-bibliotek, samt *Pandas* som benyttes til datamanipulering og -analyse. Biblioteket *NumPy* har også blitt benyttet for numerisk-utregning og -tilnærminger. Dette er alle offentlige bibliotek som er tilgjengelig i Python. Tidsintervall til datamengden som har blitt benyttet er timesbasert med 8 760 datapunkter med tilhørende tidsstempler. For å beregne verdier med andre tidsintervaller har det blitt benyttet innebygde funksjoner i programmeringsbiblioteket *Pandas* for å glatte grafene.

Data for solinnstråling og batterispesifikasjoner er spesifisert der det er relevant. Generelle data for prosjektområdet, har blitt hentet fra blant annet Statistisk Sentralbyrå og *seklima.no*. For å få beregningene så dagsaktuell som mulig har det blitt hentet data fra referansesystemet for senest mulig år med tilstrekkelige datapunkter. I tilfeller hvor datapunktene ikke har vært

tilstrekkelige, har det blitt benyttet et tidligere år, eller data for tilsvarende område. All data har blitt omgjort til kommaseparerte filer (csv-fil) for å lett kunne behandle de store datasettene.

3.3.1 Solinnstråling

Data for solinnstrålingen er hentet fra Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Dette er et system som er utarbeidet av forskningscenteret *Joint Research Centre*, underlagt EU, for å kartlegge solinnstråling. Data er hentet fra koordinatene til Transittkaia; 63.441, 10.414 – med PVGIS versjon 5.2. I følge spesifikasjonene gjelder solinnstrålingen for 15 meter over havet. Det er i hovedsak to ulike databaser for solinnstråling som er tilgjengelig i denne versjonen; *PVGIS-SARAH2* og *PVGIS-ERA5*. Sistnevnte er en reanalyse og har data for flere områder der satellittbasert data ikke er tilgjengelig, eksempelvis lenger nord enn 65°N. Det er likevel anbefalt å benytte seg av satellittbasert data, da den generelt har en mindre usikkerhet. *PVGIS-SARAH2* er benyttet i dette prosjektet for å gi et anslag av solinnstrålingen. Dette potensialet inkluderer også et systemtap på 14 %. Denne prosentandelen inkluderer blant annet tap i ledninger, invertere, snødekket og skitne panel, samt en antagelse at panelene mister effektivitet proporsjonalt med drift. Innstrålingsdata som er benyttet baserer seg på optimal helning og vinkel, fra PVGIS sine innebygde funksjoner. Dette innebærer en helning på 44° og en vinkel på 1°. Etersom det blir benyttet optimal helning og vinkel blir AM antatt lik 1,5. Siden årlig solinnstråling varierer fra år til år, er det året som treffer gjennomsnittet de siste 10 årene som har blitt benyttet, henholdsvis 2020 [128, 129].

ZEB-laboratoriet har levende data for solinnstråling på tak, frittstående pergola og fasader i alle himmelretninger. Laboratoriet ligger omtrent 3 km i luftlinje fra Transittkaia og samler data som kontinuerlig oppdateres og er tilgjengelig på nettsiden for bygget. Data for solinnstråling på ZEB-bygget er hentet fra 2023 da dette er året som har mest fullstendig data. Vest-fasaden på ZEB-laboratoriet hadde likevel ufullstendig data det gjeldende året. I samtale med Francesco Goia, professor ved NTNU, kom det frem at pyranometeret til fasaden har vært defekt og ikke motatt korrekt data før 19. mars 2024. For å illustrere ulikheter i innstråling fra himmelretningene ble data fra ZEB-laboratoriet fremstilt.

3.3.2 Valg av batteri

Basert på spesielt sikkerhetsmessige og pålitelige årsaker ble et LFP-batteri ansett som mest hensiktsmessig for Transittkaia. Tabell 2.3 presenterer batterispesifikasjoner til en tiltenkt batteripakke. For å finne ønsket størrelse på batterisystemet ble lagringskapasitet prioritert. Batteriet skal kunne lagre nok energi til å dekke elektrisitetsbehovet i et par timer i tillegg til at batterieffekten samsvarer med Transittkaia sine effekttopper. Ved å sette flere batteripakker

i parallellkobling økes strømmen, og dermed batteriets maksimale effekt som ble beregnet med Formel 2.4. Spenningen forblir tilsvarende lik grunnet batterienes parallellkobling, mens C-rate ble beregnet ut fra ønsket opp- og utladingshastighet med Formel 2.5.

3.4 Energiberegninger

Energiberegningene ble basert på mottatt data for elektrisk energibehov på Transittkaia. Videre ble solinnstråling på området benyttet for å beregne potensialet til lokal solproduksjon. Til slutt ble kombinasjonen av solproduksjon og energilagring analysert innenfor referansesystemet. For grafene som fremstiller behov, ble gjennomsnittet fremhevet med den innebygde funksjonen *mean* fra statistikk modulen i Python. For å illustrerer produksjon og energiflyt på Transittkaia, er hovedgrunnlaget innhentet data for solinnstråling og elektrisk energibehov. For å beregne netto energi ble Formel 2.7 benyttet. Negative verdier fremstiller mangel på energi – behov for å kjøpe, mens positive verdier fremstiller et overskudd av energi – mulighet for å selge til grid, eller eventuelt til lagring og senere bruk. Fremstilling av disse verdiene la grunnlaget for sammenligning mellom både uker og dager i løpet av et år.

3.4.1 Energibehov

Data for energibehovet tiltenkt Transittkaia refererer til to scenarier som er definert som henholdsvis et basescenario (BL) og energieffektivt scenario (EE). *EE* innebærer energieffektive bygninger som krever mindre energi. Begge scenarioene har en tidsoppløsning på én time, og maksimal effekt er ikke mulig å fastslå kun basert på scenarioets data. Det elektriske og termiske energibehovet ble visualisert gjennom grafer både årlig og ukentlig. Analysene for dette prosjektet tar utgangspunkt i datapunkter fra *BL* som refererer til energibehov uten ekstra energieffektive tiltak for å ikke underdimensjonere energisystemet.

3.4.2 Solproduksjon

For flatene som installeres med solcellepanel antas det *mono-krySTALLinsk*-panel med en felles virkningsgrad og et areal tilsvarende en fjerdedel av Nyhavnas planlagte areal for installasjon av solcellepaneler. Teknologien til solceller vil bli betraktelig effektivisert, og en høy virkningsgrad kan i utgangspunktet antas. Det vil i praksis også bli benyttet solcelleteknologi som har laverer effektivitet. Bygningene er soloptimalisert selv om samtlige solcellepaneler ikke vil være vinklet samme retning og vil dermed ha ulike virkningsgrader gjennom året og døgnet. Det antas at alle planlagte solcelleareal ikke påvirkes av skyggeforhold. I tillegg antas det lik høyde på samtlige bygninger. For beregningene ble det benyttet en felles virkningsgrad på 19,5 % som gjelder for solceller på tak og fasadene og ble basert på Formel 2.1. For å beregne produsert energi fra

solcellepanel på Transittkaia ble Formel 2.2 benyttet. Solinnstrålingen fra PVGIS ble multiplisert med antatt virkningsgrad og solcellepanelenes totale areal.

3.4.3 Utnyttelse av batteri

Den elektriske energilagringen som ble beregnet har tatt utgangspunkt i forventede lastprofiler, energioptimalisering og totalt elektrisk energibehov for Transittkaia.

Batteripakkens egenskaper ble benyttet for å illustrere potensialet for energilagring i kombinasjon med energiproduksjon fra solcellepanel. Implementeringen av batteri ble utført trinnvis hvor det i første omgang ble skrevet en funksjon som lagrer strøm når nettoenergien går i overskudd. Batteriet blir utladet igjen når forbruket oversteg produksjonen. For batterisystemet på Transittkaia ble det antatt en minimal og maksimal SoC på henholdsvis 20 og 80 % som BESS ble antatt å operere i.

Basert på lastprofiler og historiske strømpriser ble det mulig å kartlegge hvilke dager i løpet av et år som er mer effektkrevende og dyre enn andre. Parametre som værprognoser, dagsaktuell spotpris og forventet last på langt kortere tidsoppløsning, bidro til en kompleks utregning. For denne oppgaven har det blitt gjort forenklinger i forhold til opp- og utladning av BESS, da dette i teorien styres av komplekse algoritmer. Generelt ble det på dagtid antatt en C-rate på 10 % av BESS sin opprinnelige C-rate. Denne verdien ble satt for å begrense tilført strøm til batteriet under opplading, i timer med særlig høy energiproduksjon. Under følger tre kriterier som avgrenser oppladning [+] og utladning [-] for BESS denne oppgaven.

1. Dersom det er de mørkeste vinterukene, definert som perioden mellom uke 49 og uke 6, vil *peak-hours* være mellom 06:00-10:00 og 16:00-21:00.

- + Lagring av energi vil i de mørkeste vintermånedene skje i perioder med billig strøm. I forenklingen betyr det å lagre energi på natten. Natten er definert som tidsrommet mellom 22:00 - 06:00. Batteriet vil her bli oppladet med 50 % av netto elektrisitetsbehov for den respektive timen. Det betyr at for en tilfeldig time med 500 kWh/h i elektrisitets behov, kan batteriet bli oppladet med 250 kWh/h energi for den samme timen. 50 % antas for å ivareta batteriets ytelse og levetid.

- Lagret energi vil kun bli benyttet på dagtid. I *peak-hours* og *off-peak-hours* betyr det henholdsvis 30 % og 20 % av netto energi for den respektive timen. Det betyr at batteriet reduserer det elektriske energibehovet med tilhørende prosentandel for angitt time.

2. Dersom det er sent på høsten eller tidlig på våren, i henholdsvis perioden fra og med uke

42 til 49, eller fra uke 6 til og med uke 11, er det ønskelig å fortsatt kjøpe noe energi på natten. Her er også *peak-hours* mellom 06:00 - 10:00 og 16:00 - 21:00, med samme tidsrom for natten.

- + Det vil fortsatt bli lagret energi på natten. Muligheten for å lagre energi er satt til 30 % av netto elektrisitetsbehov for den respektive timen.
- Lagret energi vil i hovedsak bli benyttet under *peak-hours* og generelt på dagtid, med henholdsvis 40 % og 30 % av netto energi for den respektive timen.

3. Dersom det *ikke* er vintermåned vil solproduksjon dekke store deler av oppladingen og det antas dermed at det ikke kjøpes energi til lagring i BESS.

- + I perioder der solproduksjon overgår forbruket vil batteriet lagre energi. For å sørge for bærekraftig opp- og utlading av batteriet begrenser C-raten denne prosessen.
- På dagtid skal energisystemet unngå å kjøpe energi, og opplagret elektrisitet kan dermed brukes. Det er ønskelig at overskuddet selges for å utnytte prisforskjeller. I sommerhalvåret forventes det likevel at BESS i større grad vil nå maksimal SoC. Det betyr at lagret energi også kan benyttes i *off-peak-hours*, eller eventuelt brukes til andre formål som termisk lagring, hydrogenproduksjon o.l.

Valgt SoC-intervall for BESS ble plottet i samme graf som utnyttelse av energilagringen. Formel 2.6 illustrerer hvordan SoC ble regnet ut og omgjort til prosent for hver enkelte time gjennom året. Denne utregningen la grunnlaget for å beregne antall sykluser som ble gjennomført for en tidsperiode. Antall sykluser ble beregnet etter antall ganger mengden oppladet og utladet energi samsvarer med batteriets kapasitet innenfor SoC-intervallet.

4 Resultater

For å kunne sammenligne den elektriske energiflyten, kombinasjonen mellom elektrisitetsbehov, solproduksjon og energilagring er resultatene plottet i ulike tidsrom i løpet av referanseråret. Energiflyten fra uke 25 og uke 29 er plottet for å sammenligne to sommeruker med henholdsvis stor mengde solproduksjon og moderat mengde solproduksjon. Samtidig er uke 52 og uke 9 plottet for å sammenligne en vinteruke med henholdsvis ingen solproduksjon og en vinteruke med noe solproduksjon. Tabeller med faktisk data fra de respektive ukene er presentert for å kunne sammenligne håndfaste tall. Resultater legger grunnlag for den videre diskusjonen om energisystemet på Transittkaia.

4.1 Energibehov

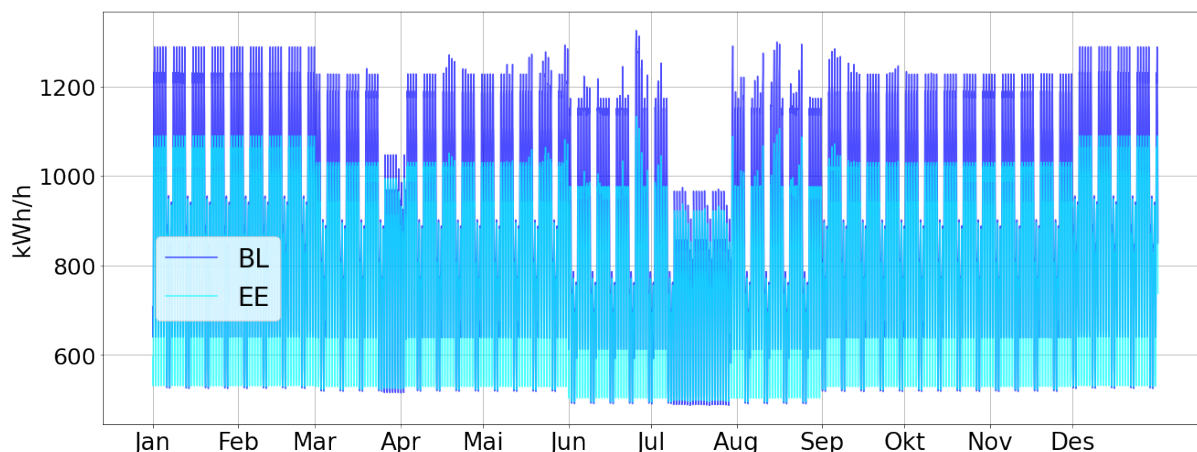
Energibehovet dekker både det elektriske og det termiske behovet på Transittkaia. Resultatene har benyttet 8 760 datapunkter og plottet disse visuelt.

4.1.1 Elektrisk energibehov

Figur 4.1 viser en timesbasert oversikt over det totale elektriske energibehovet for Transittkaia, fra 1. januar til 31. desember. Den mørkeblå kurven illustrerer BL for det elektriske energibehovet, mens den lyseblå kurven viser det elektriske energibehovet for EE. Linja kan oppfattes som søyler da energinivået er svært likt fra dag til dag, og uke til uke. Kurvene illustrerer forskjeller mellom årstidene, i tillegg til perioder for hver måned med merkbart lavere energibehov.

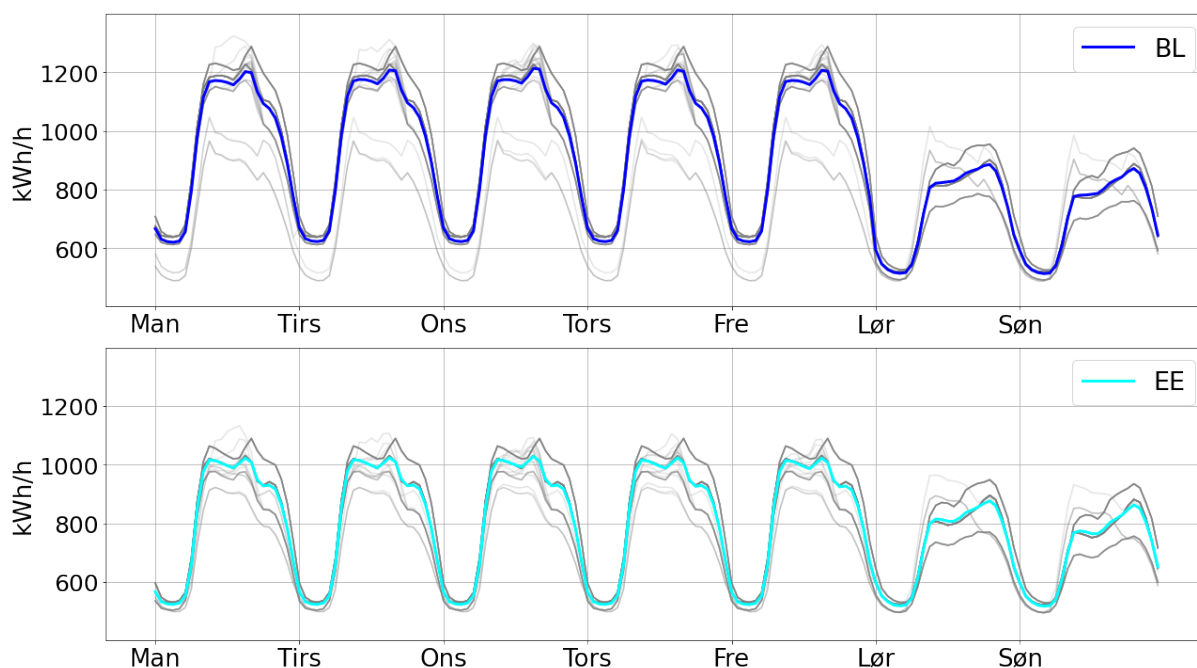
Det maksimale energibehovet for BL ligger stødig på omtrent 1 300 kWh/h fra januar til mars, samt i desember. Fra mars til mai og fra oktober til desember er det maksimale energibehovet på omtrent 1 250 kWh/h. Merk at siste uka i mars, i tillegg til tre uker i juli, skiller seg ut ved å ha et lavere maksimalt energibehov på omtrent 1 050 kWh/h og 950 kWh/h. Resterende uker mellom mai og oktober varierer energibehovet, og er høyest i slutten av juni med et behov på omtrent 1 350 kWh/h.

Energibehovet for EE er relativt lik BL, men krever jevnt over året mellom 15 % og 20 % mindre energi for hver respektive time. Figuren viser en maksimalt energibehov på 1 100 kWh/h fra januar til mars, samt i desember. Fra mars til juni, samt fra september til desember er energibehovet på omtrent 1 040 kWh/h. Likt som i BL er det én uke i mars og tre uker i juli som har et lavere maksimalt energibehov som tilsvarer litt over 900 kWh/h. I de resterende ukene i juni og august har energibehovet større variasjoner og når sitt absolutt høyeste timesforbruk i slutten av juni – med et behov på omtrent 1 150 kWh/h.



Figur 4.1: Elektrisk energibehov på Transittkaia for de to scenariene – Basescenario og Energieffektivt scenario.

Videre presenterer Figur 4.2 lik data som Figur 4.1, bare med større hensyn på å illustrere uke- og dagsforskjeller. Kurvene i grafene presenterer data for hver time i løpet av valgte uker, tilsvarende 168 datapunkter, med BL og EE hver for seg. Det er 52 grå individuelle kurver i hver av de to grafene som representerer hver enkelt uke. Gjennomsnittet av disse er presentert som den blå (BL) og lyseblå (EE) kurven i hver av de to grafene.



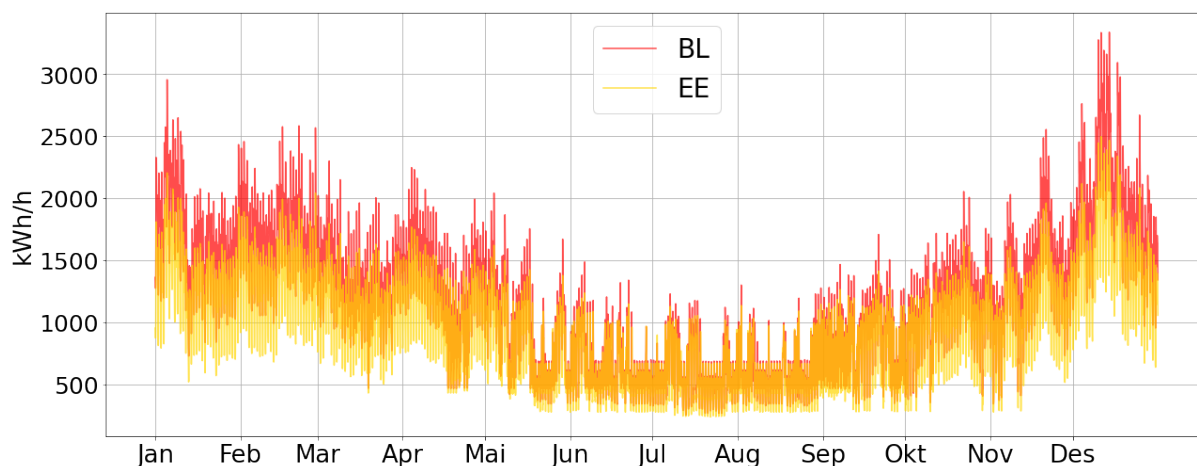
Figur 4.2: Elektrisitetsbehov for hver enkelt uke, med gjennomsnittet fremhevet for scenariene - Basescenario og Energieffektivt scenario.

Forskjellene fra dag og kveld, samt fra ukedag til helg blir presentert oversiktlig i Figur 4.2. De grå kurvene i figuren tilsvarer uker som sammen utgjør gjennomsnittet. Det elektriske behovet er relativt likt for de ulike ukene og majoriteten representeres godt av den fargelagte kurven.

I ukedagene er det gjennomsnittlige energibehovet tilnærmet like stort på dagtid, i underkant av 1 200 kWh/h for BL og rundt 1 000 kWh/h for EE. På natten blir energibehovet tilnærmet halvert i forhold til dagen, for begge scenarioene. Figur 4.2 illustrerer også en tydelig forskjell fra ukedag til helg. Helgene har et maksimalt energibehov på rundt 900 kWh/h, mens minimalt energibehov tilsvarer rundt 500 kWh/h for BL. Det energieffektive scenarioet har likt elektrisk behov på natten gjennom hele uka som tilsvarer rundt 550 kWh/h.

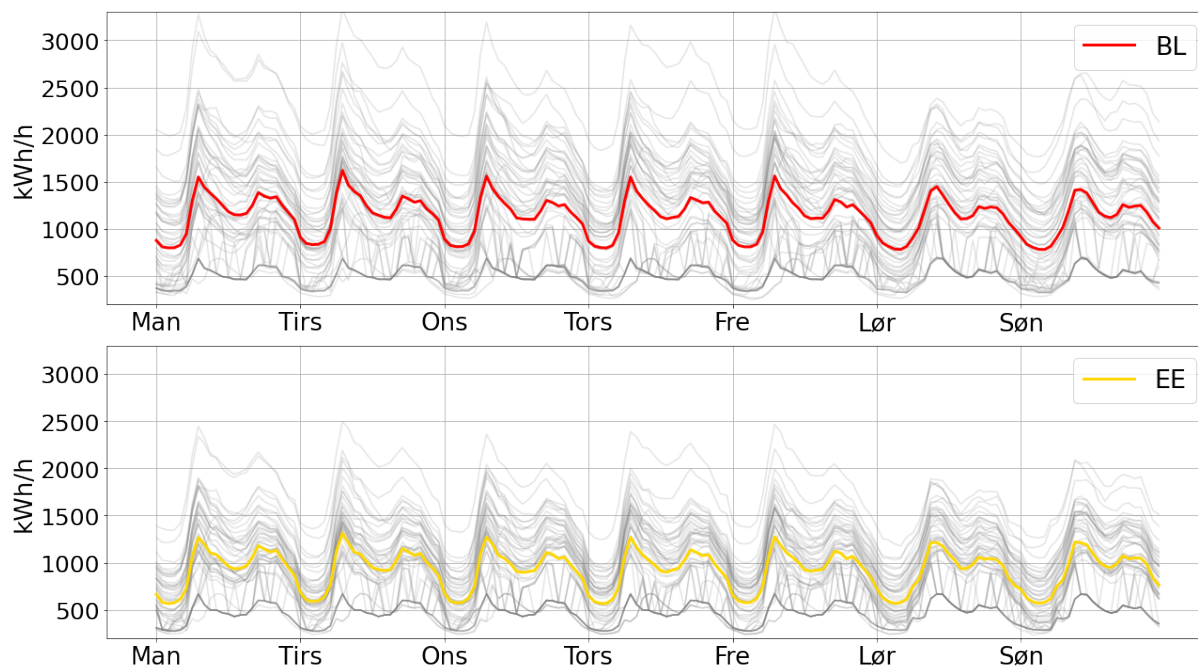
4.1.2 Termisk energibehov

Figur 4.3 viser en timebasert oversikt over det termiske behovet for Transittkaia, fra 1. januar til 31. desember, likt som det elektriske behovet. Rød og gul kurve presenterer termisk energibehov for henholdsvis BL og EE. Merk at det som kan se ut som en tredje oransje kurve er derimot de to andre kurvene som overlapper. Slik som på det elektriske behovet illustrerer den årlige grafen kun sesongvariasjonene. Både for BL og EE er det termiske energibehovet langt større i vintermånedene enn i sommermånedene. Variasjonene mellom de to scenarioene er også større i vintermånedene. Fra juni til september er det termiske energibehovet for BL og EE tilnærmet likt, der det varierer fra omtrent 700 kWh/h til 1250 kWh/h. I desember er det maksimale energibehovet for BL på 3400 kWh/h og er på 2500 kWh/h for EE.



Figur 4.3: Termisk energibehov på Transittkaia for de to scenarioene – Basescenario og Energieffektivt scenario.

Figur 4.4 presenterer en ukentlig oversikt over det termiske energibehovet for hver uke. Her presenterer den øverste grafen energibehovet for BL, mens den nederste grafen er energibehovet for EE. Den røde og gule kurven illustrerer gjennomsnittlig termisk energibehovet for henholdsvis BL og EE. De grå kurvene illustrerer det termiske energibehovet i hver individuelle uke for de to ulike scenarioene. Kurvene presenterer data for hver time i løpet av uken, tilsvarende 168 datapunkter.

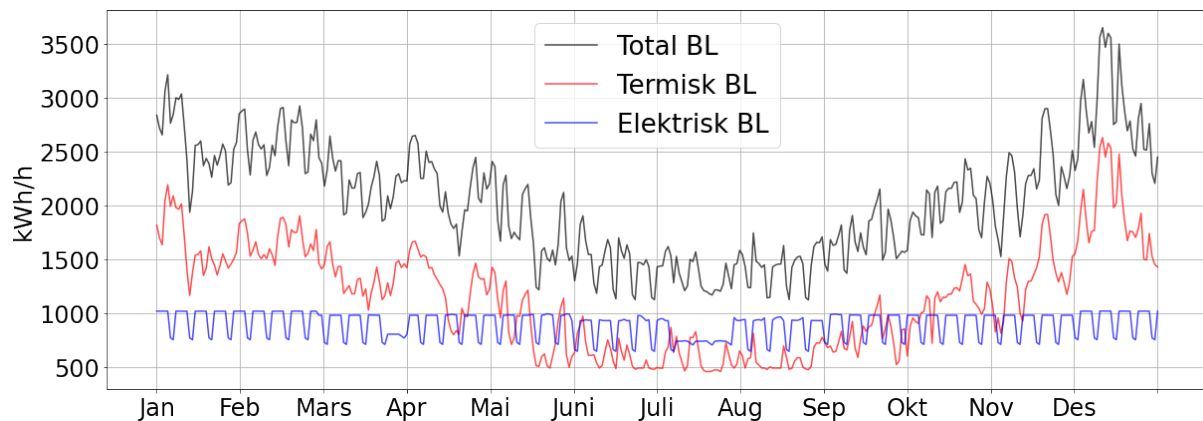


Figur 4.4: Termisk behov for hver enkelt uke, med gjennomsnittet fremhevet for scenarioene - Basescenario og Energieffektivt scenario.

I motsetning til det elektriske behovet er det mindre variasjoner fra helg til ukedager for det termiske behovet. Gjennomsnittet viser en tydelig trend med et høyere termisk behov tidlig på dagen og på ettermiddagen. Her er det termiske behovet henholdsvis i overkant av 1 500 kWh/h og 1 300 kWh/h for BL, samt 1 300 kWh/h og 1 200 kWh/h for EE. Figur 4.4 illustrerer også stor forskjell i de individuelle ukene. Fra uken med størst til minst termisk behov, går det maksimale behovet fra 3 300 kWh/h til 700 kWh/h på BL og fra 2 500 kWh/h til 700 kWh/h på EE.

4.1.3 Totalt energibehov

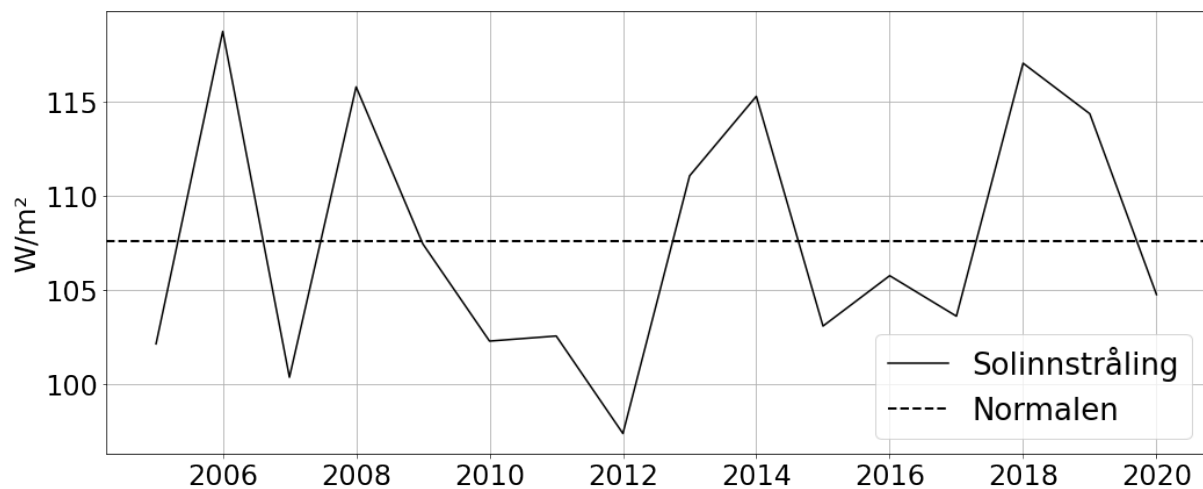
Figur 4.5 illustrerer data for det daglige gjennomsnittet i løpet av året for BL, tilsvarende 365 datapunkter. Det totale energibehovet presenteres sammen med gjennomsnittlig termisk og elektrisk energibehov. Grafene presenterer tydelige ulikheter mellom termisk- og elektrisk energibehov, og inneholder forøvrig samme verdier som de foregående grafene. Merk at Figur 4.5 presenterer det daglige gjennomsnittlige energibehovet og at dermed timesbasert forskjeller og effekttopper ikke blir illustrert.



Figur 4.5: Totalt energibehov på Transittkaia i Basescenario med daglige gjennomsnittsverdier.

4.2 Solinnstråling

Figur 4.6 illustrerer den gjennomsnittlige solinnstrålingen basert på alle timene for hvert år fra 2005 til 2020. De årlige variasjonene i solinnstråling er presentert i forhold til normalen for de 15 årene, som ligger på $107,5 \text{ W/m}^2$. Det året med størst gjennomsnittlig solinnstråling var 2006, mens året med minst gjennomsnittlig solinnstråling var 2012, med henholdsvis 119 W/m^2 og 50 W/m^2 . Merk at enheten W/m^2 her presenterer gjennomsnittet av alle timene i de ulike årene.



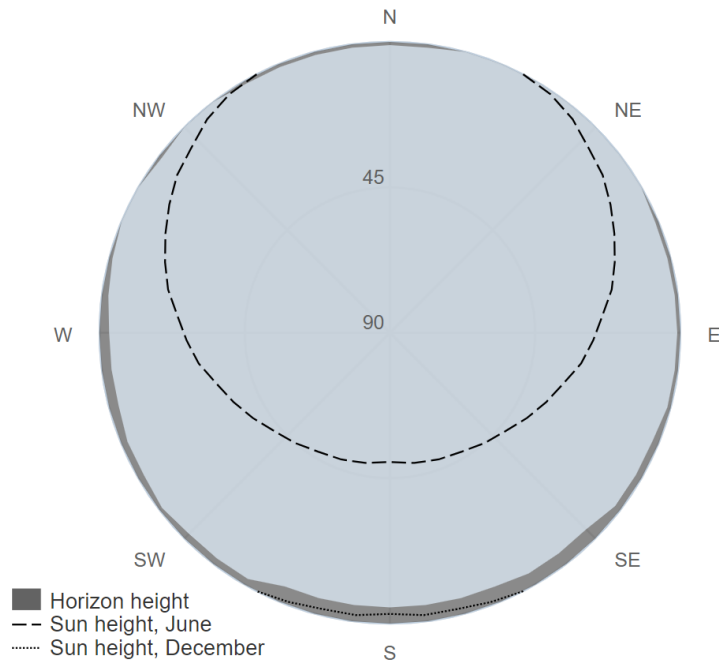
Figur 4.6: Gjennomsnittlig solinnstråling fra 2005 til 2020 med normalen for alle årene illustrert med stiptet kurve.

Gitt den maksimale solinnstråling for 2020 som er $1\,104,29 \text{ W/m}^2$, resulterer det i en maksimal effekt på $5\,383,41 \text{ kWp}$, ut fra Formel 2.3.

$$E_{maks} = \frac{\max(G(2020)) \cdot 0,195 \cdot 25\,000}{1\,000} = 5\,383,41 \text{ kWp}$$

Figur 4.7 illustrerer solens høyde og vinkel for Transittkaia i forhold til himmelretninger.

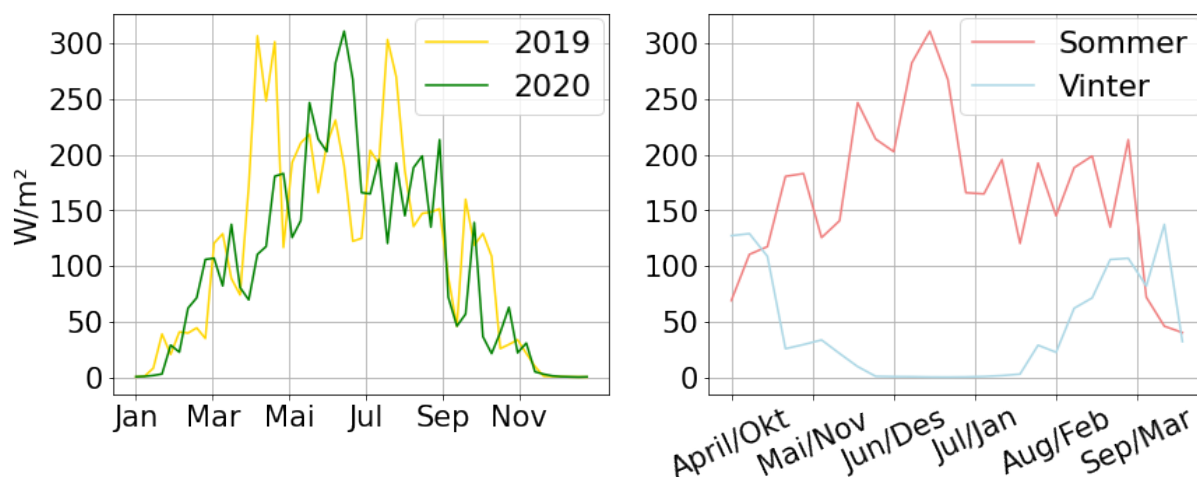
Figuren er hentet fra PVGIS med data fra 2020, med koordinater for Transittkaia. Denne illustrasjonen fra PVGIS får frem potensialet for solinnstrålingen med hensyn til lokale åser og fjell. Beregningen tar derimot ikke hensyn til svært nærliggende hus eller mikrolende som også gir skygge.



Figur 4.7: Solens vinkel over Transittkaia i juni og desember sammen med høyden på horisonten [128].

4.2.1 Sammenligning av ukentlig solinnstråling

Figur 4.8 illustrerer ukentlig solinnstråling for Transittkaia oppgitt i W/m^2 . I grafen til venstre blir solinnstrålingen for 2019 og 2020 presentert. De to kurvene er relativt like fra januar til april og fra august og ut desember. I sommermånedene er det derimot betraktelig større variasjon, der spesielt data fra 2019 viser hvor store variasjoner som kan forekomme. Grafen til høyre illustrerer forskjellene mellom sommer og vinter enda tydeligere. Data er hentet fra oktober 2019 til mars 2020 for vinteren, og fra april 2020 til september 2020 for sommeren. Særlig på vinteren er det meget lav solinnstråling, som gradvis øker fram mot juni. Gjennomsnittlig verdi for solinnstråling per uke i juni ligger på litt over $300 W/m^2$ i timen. Etter juni begynner solinnstrålingen å avta igjen fram mot vinteren.

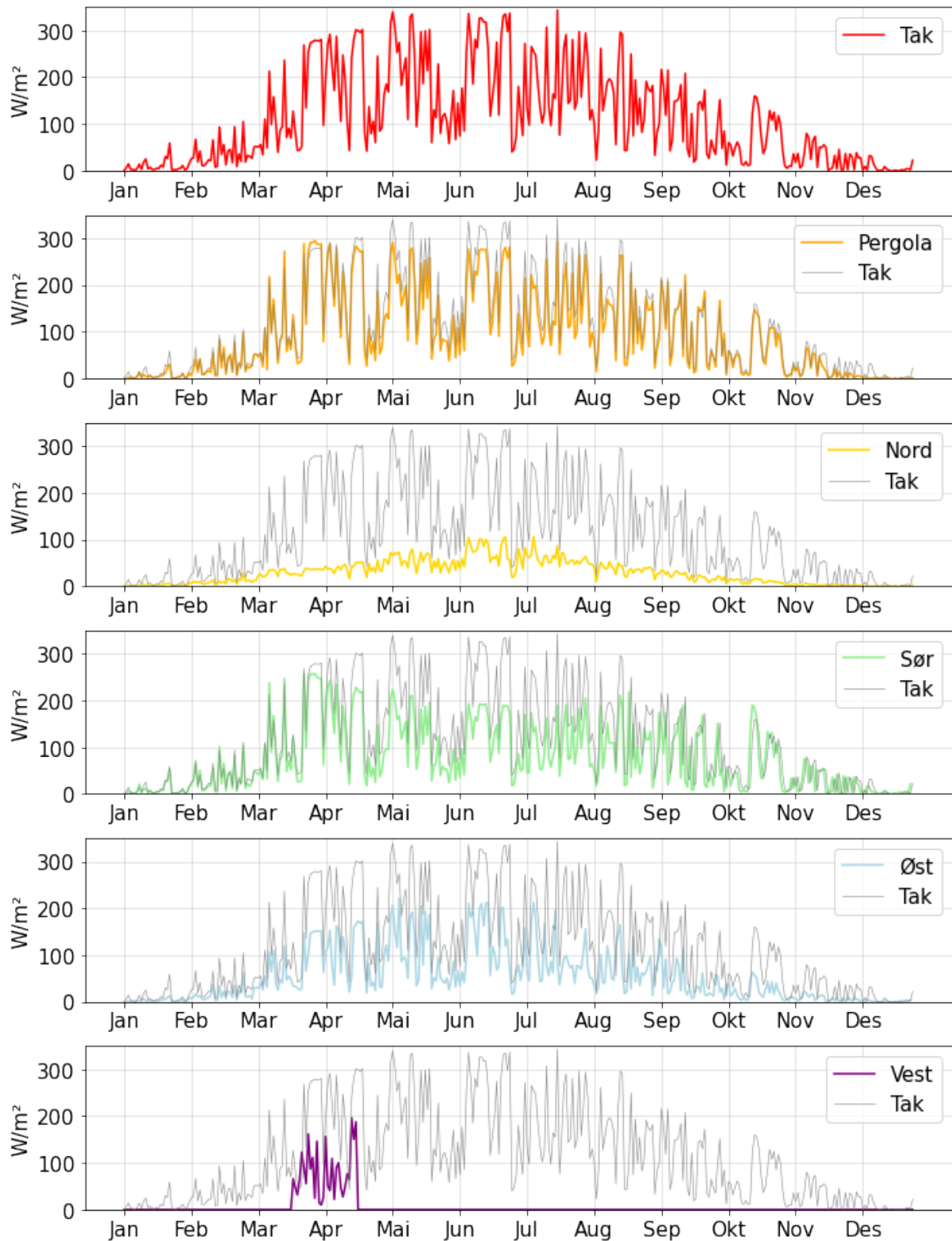


Figur 4.8: Solinnstråling i 2019 og i 2020, samt utklipp fra sommer og vinter

Videre blir solinnstrålingen for ZEB-laboratoriet i 2023 presentert i Figur 4.9. Data er målinger fra henholdsvis taket, sørvendt pergola, samt fire ulike fasader som er tilpasset de fire himmelretningene nord, sør, øst og vest. I hver graf er solinnstrålingen plottet for å kunne gi et godt sammenligningsgrunnlag. Merk at data for fasade-vest viser solinnstråling fra 19.mars 2024 til skrivende stund grunnet tekniske problemer. Tidsintervallet for samtlige grafene for solinnstråling for ZEB-fasader er gitt i daglige verdier, tilsvarende 365 datapunkter.

I den øverste grafen viser den røde kurven solinnstrålingen for taket, og er den grafen med høyest innstråling. Taket har store variasjoner i mengden innstråling, men totalt sett går grafen jevnt fra ingen solinnstråling i januar til omtrent $300 W/m^2$ i sommermånedene, og deretter jevnt ned igjen mot desember. Solinnstråling for taket vil bli presentert videre i resterende grafer som grå kurve for sammenligning. I den andre grafen viser den oransje kurven solinnstrålingen for den sørvendte pergolaen, med tilnærmet like verdier som taket. I den tredje grafen illustreres gul kurve som nordfasaden. Solinnstrålingen for nordfasaden skiller seg mest ut fra taket, ettersom den tydelig har lavest innstråling. Solinnstrålingen er nesten aldri over $100 W/m^2$ i sommermånedene, og ligger rundt $50 W/m^2$ jevnt fra mars til september og helt ned til ingen innstråling i vintermånedene.

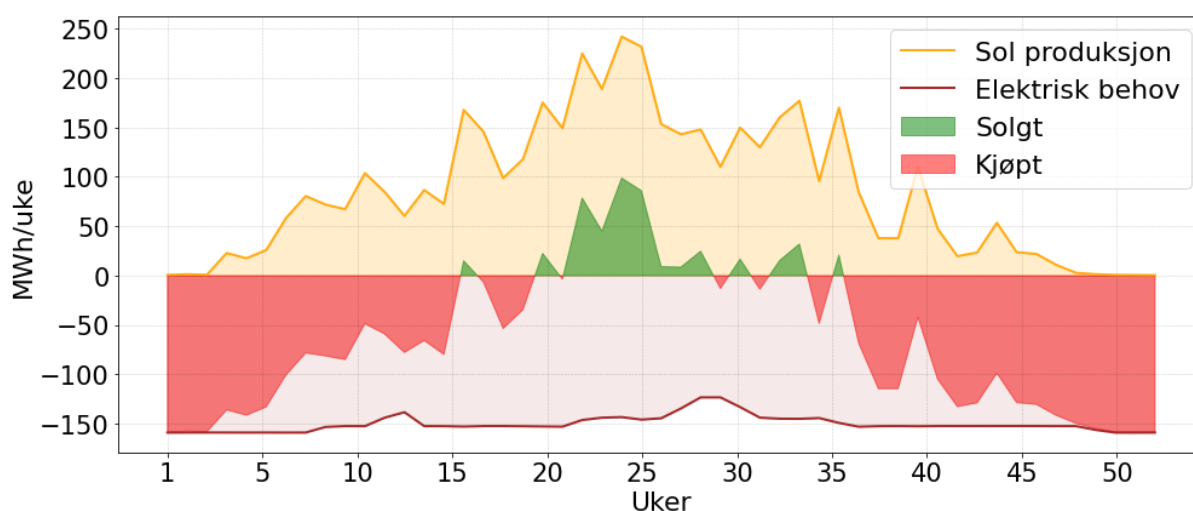
Den fjerde grafen illustrerer solinnstråling for sørfasaden som er vinklet mot solen, med grønn kurve. Mellom april og september er variasjonene mellom sørfasade og taket stor. I den femte grafen presenterer blå kurve solinnstrålingen til østfasaden. Denne utgjør to-tredjedeler av innstrålingen til taket, og følger stigningen til grafen for taket tilnærmet parallelt. Den siste grafen illustrerer solinnstrålingen for vestfasaden med lilla kurve. Sørfasaden og pergola er de eneste fasadene som i enkelte perioder har høyere solinnstråling enn taket.



Figur 4.9: Solinnstrålingsdata fra alle fasader, pergola og tak på ZEB-laboratoriet.

4.3 Solproduksjon og elektrisitetsbehov

Figur 4.10 illustrerer energiflyten for Transittkaia i 2020 og inkluderer produsert elektrisk energi fra solcellepanel, det elektriske energibehovet for BL, samt hvor mye av denne elektrisiteten som kan kjøpes og selges fra kraftnettet. Produsert energi fra solceller er illustrert som gul kurve, mens elektrisk energibehov er illustrert som brun kurve med negative verdier. Arealet som er farget i grønt presenterer overskuddsenergi, mens rødt tilsvarende energiunderskuddet som må kjøpes fra kraftnettet. Fra januar til mai samt september til desember er det tilnærmet ingen overskuddsenergi, og Transittkaia må dermed kjøpe elektrisitet fra kraftnettet for å dekke behovet. På sommerhalvåret er derimot overskuddsenergien langt større.



Figur 4.10: Ukentlig energiflyt for et helt år på Transittkaia.

4.3.1 Sommeruker med ulik mengde solinnstråling

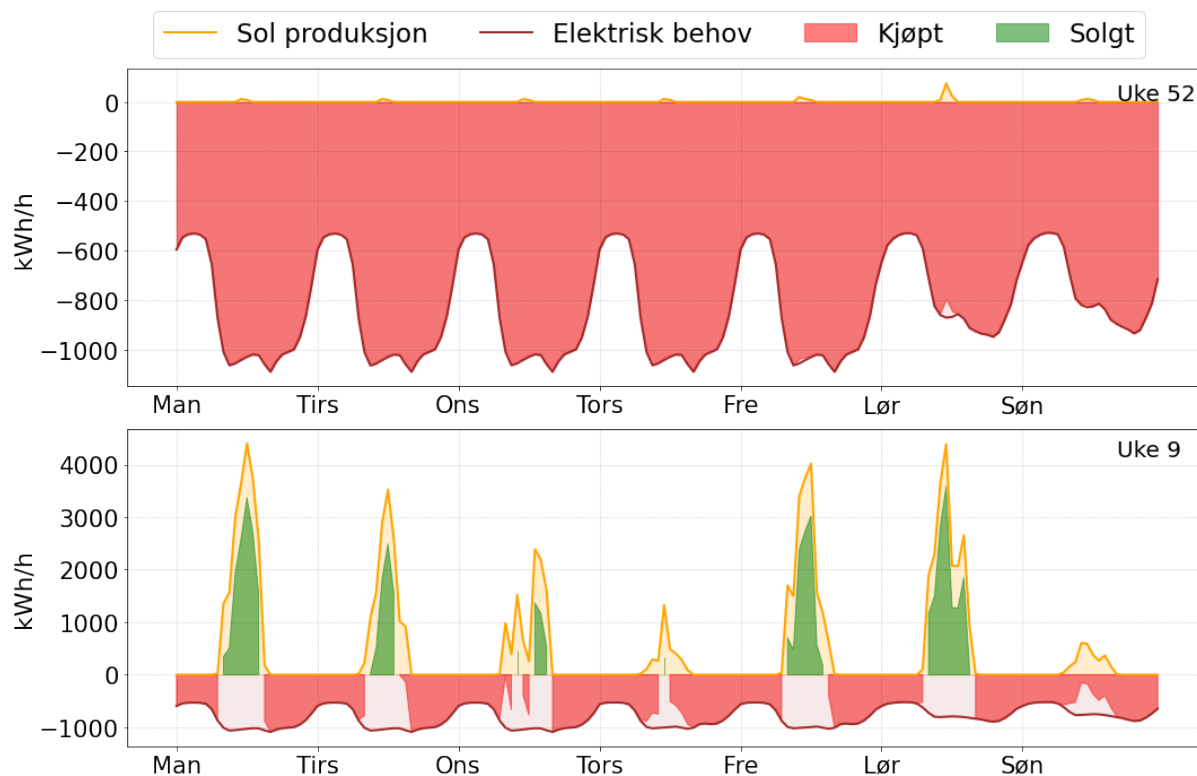
Figur 4.11 illustrerer energiflyten i to ulike sommeruker, derav en god og en dårlig sommeruke med hensyn på elektrisitet produsert av solcellepanelene. Den øverste grafen viser energiflyten for uke 25, mens den nederste grafen viser energiflyten for uke 29. Energiflyten inkluderer også hvor mye egenproduksjon som kommer fra solcellepanelene, det elektriske behovet for BL, samt hvor mye elektrisitet som blir kjøpt fra eller solgt til nettet. Uke 25 er en sommeruke som produserer store mengder overskuddsenergi. Fredagen illustrerer likevel en dag med mindre solinnstråling. Dette resulterer i et større behov for å kjøpe elektrisitet på dagtid, selv når det produseres elektrisitet fra solcellene. Videre referer uke 29 til en periode med lavere solinnstråling og dermed lavere produksjon enn uke 25. Dårligere solinnstråling krever dermed mer kjøp av elektrisitet på dagtid. Mindre solproduksjon denne uken resulterer i noe mindre overskuddsenergi og dermed mindre potensiale for å selge tilbake til strømmettet sammenlignet med uke 25.



Figur 4.11: Energiflyt for to sommeruker, med mye og moderat mengde solproduksjon

4.3.2 Vinteruker med ulik mengde solinnstråling

Figur 4.12 illustrerer energiflyten i to ulike vinteruker. Den øverste grafen presenterer uke 52, og den nederste grafen presenterer uke 9. Energiflyten inkluderer hvor mye egenproduksjon som kommer fra solcellepanelene, det elektriske behovet for BL, samt hvor mye elektrisitet som blir kjøpt fra eller solgt til nettet. Uke 52 har tilnærmet ingen egenproduksjon av elektrisitet, og er derfor avhengig av å kjøpe elektrisitet fra nettet. Midt på lørdag i uke 52 er det én time med noe solproduksjon. Det fører til en liten reduksjon i mengde kjøpt energi for den samme timen. I uke 9 er det mer solinnstråling enn i uke 52 og dermed også mer egenproduksjon av elektrisitet fra solcellepanelene. Mandag og lørdag er de dagene med størst egenproduksjon og det kan dermed selges mye til nettet.



Figur 4.12: Energiflyt for to vinteruker, med ingen og noe solproduksjon

4.4 Utnyttelse av batteri

Tabell 4.1 presenterer batteriets spesifikasjon både per batterisystem og for total BESS (batterier i parallellkobling). Ytterligere spesifikasjoner til det benyttede batteriet er presentert i Vedlegg D. Den nominelle energien er omtrent seks ganger så stor og øker fra 2 064 kWh til 12 384 kWh, ettersom det er 6 batteri i parallellkobling. Effekten øker fra 1 000 kW til 6 170 kW, og den nominelle kapasiteten øker fra 1 680 Ah til 10 080 Ah. Den nominelle DC spenningen forblir det samme og maks utladning og oppladning går fra 836,8 A til 5 020,8 A.

Tabell 4.1: Batteri spesifikasjoner for parallellkobling [130]

	Per batteripakke	Total BESS (parallellkobling)
Nominell energi	2 064 kWh	12 384 kWh
Effekt (AC)	1 000 kW	6 170 kW
Nominell kapasitet	1 680 Ah	10 080 Ah
Nominell DC spenning	1 228.8 V	
Maks lading	836,8 A	5 020,8 A
Maks utladning	836,8 A	5 020,8 A

Valgt batterikapasitet resulterer i en maksimal C-rate lik 0,5 C.

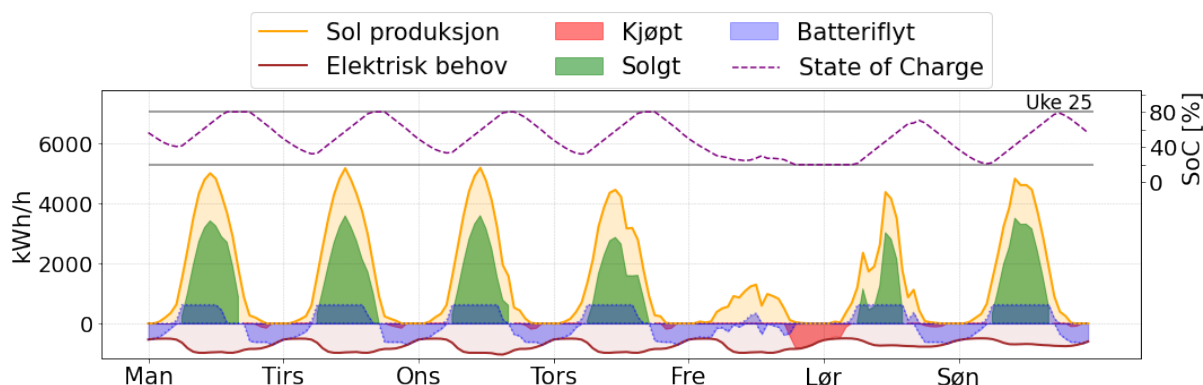
$$C\text{-rate}_{maks} = \frac{5\,020,8\text{ A}}{10\,080\text{ Ah}} \approx 0,5\text{ C}$$

For å illustrerer energiflyten kombinert med energilagring presenteres det videre grafer med produsert elektrisk energi fra solcellepanel, det elektriske energibehovet for BL, samt hvor mye av denne elektrisiteten som kan kjøpes og selges fra kraftnettet. Produsert energi fra solceller er illustrert som gul kurve, mens elektrisk energibehov er illustrert som brun kurve med negative verdier. Arealet under brun kurve illustrerer totalt elektrisitetsbehov som enten dekkes av egenproduksjon, lagret eller kjøpt elektrisitet. Arealet som er farget i grønt presenterer overskuddslektrisitet, mens rødt tilsvarer energiunderskuddet som må kjøpes fra kraftnettet. I tillegg inkluderer energiflyten kombinasjonen med batteri illustrert med blått areal. Negative verdier i batteriflyten indikerer utlading av BESS, mens positive verdier indikerer opplading.

Videre blir SoC representert med en lilla stiplet kurve øverst i figuren. Batteriets SoC er som tidligere nevnt mellom 20 % - 80 %. Når batteriet lades opp, øker verdiene for SoC, og motsatt ved utlading. Merk at energiflyten er timesbasert og at figurene ikke illustrerer alle effekttopper hvor mer energi må kjøpes, eller lave effektperioder hvor overskuddet kan selges. En slik visualisering av nevnt data blir presentert for samme uker som tidligere figurer, henholdsvis uke 25, 29, 52 og 9. Sammen med visualisering gjennom grafer blir verdiene for gjeldende uker fremstilt i tabeller for å få enkelte verdier tydeligere frem. Samtlige tabeller presenterer verdier for produksjon av elektrisitet fra solcellepanel, det elektriske energibehovet, oppladning og utladningen til batteriet, samt netto solgt eller kjøpt elektrisitet. Negative verdier tilsvarer salg av elektrisitet, og motsatt for kjøp. Formel 2.7 viser utregningen for netto energi.

4.4.1 Energiflyt kombinert med energilagring i sommeruke

Uke 25 illustrert med Figur 4.13 er en sommeruke med mye innstråling. SoC-kurven viser at det kun er på fredag batteriet blir helt utladet, og som også er en av de få dagene der det om natten må kjøpes en del elektrisitet fra nettet. Resterende dager blir behovet dekket nesten utelukkende av batteriet. Gjennom uke 25 er det en time i løpet av kvelden hvor det er behov for å kjøpe elektrisitet for å dekke energibehovet. Dette kommer av at batteriet har nådd maksimal utladningsevne. Batteriets maksimale oppladningsevne bidrar til at det kan selges overskuddslektrisitet over en lengre periode.



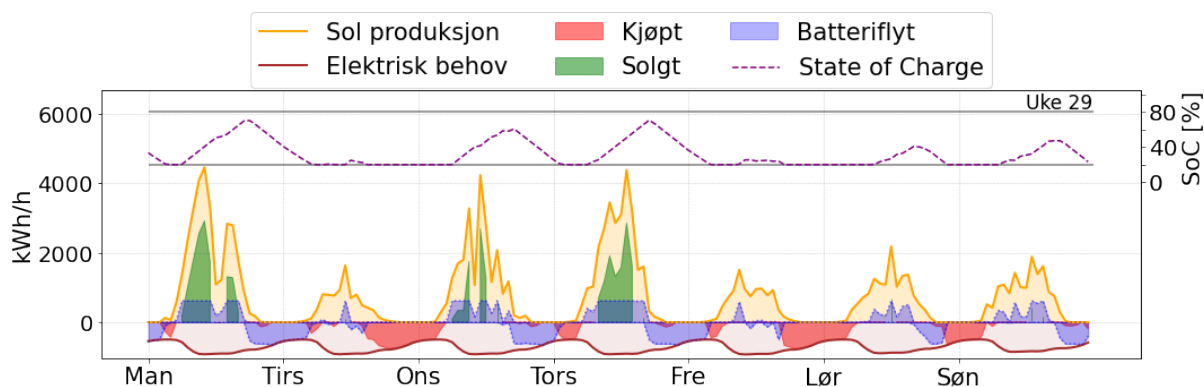
Figur 4.13: Energiflyt kombinert med batteriflyt og SoC i uke 25

Tabell 4.2 får tydelig frem at fredag, som illustrert i Figur 4.13, er eneste dagen hvor solproduksjon ikke overgår energibehovet. Selv etter utlading av batteriet har denne dagen 4 143,76 kWh med energiunderskudd. Totalt sett har Transittkaia i uke 25 en solproduksjon på 239 560,77 kWh, et elektrisk energibehov som er på 125 017,83 kWh. Inkludert batteriets opp- og utlading har uken et energioverskudd på 115 180,24 kWh.

Tabell 4.2: Energiflyt for uke 25

	Solprod. [kWh]	El-behov [kWh]	Opplading		Utlading		Netto [kWh]
			[kWh]	[%]	[kWh]	[%]	
Man	41 703,68	18 722,01	4 874,80	39,36	5 728,60	46,26	-23 835,46
Tirs	41 992,62	18 723,03	5 903,97	47,67	5 930,91	47,89	-23 296,52
Ons	40 029,84	18 953,79	5 776,37	46,64	5 939,78	47,96	-21 239,46
Tors	37 133,31	18 721,11	5 935,04	47,93	5 720,64	46,19	-18 197,80
Fre	10 905,33	18 727,12	691,78	5,59	4 369,81	35,29	4 143,76
Lør	27 222,49	15 795,36	6 225,31	50,27	4 091,03	33,03	-9 292,85
Søn	40 573,50	15 375,41	7 122,70	57,52	5 386,51	43,50	-23 461,91
Total	239 560,77	125 017,83	36 529,97	294,98	37 167,28	300,12	-115 180,24

Uke 29 illustrert med Figur 4.14 er en sommeruke med mindre solinnstråling sammenlignet med uke 25. Batteriet i denne uken aldri blir fulladet, selv med dager som ender opp med å selge elektrisitet til nettet. I uke 29 illustrerer batteriflyten en trend med opplading på dagen, og utlading på natten. Energiproduksjonen er særlig ujevn denne uka og batteriet blir dermed fullt utladet før neste oppladingsyklus begynner.



Figur 4.14: Energiflyt kombinert med batteriflyt og SoC i uke 29

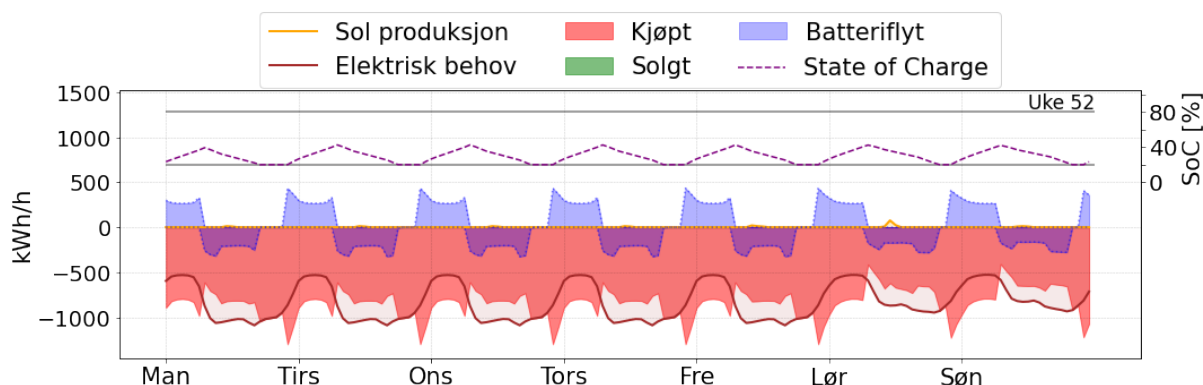
Tabell 4.3 bekrefter at det totalt for dagen må kjøpes mer energi fra nettet enn det som produseres både tirsdag, fredag, lørdag og søndag. Totalt sett har Transittkaia i uke 29 en egenproduksjon på 127 356,74 kWh, et elektrisk energibehov som er på 121 651,09 kWh. I tillegg til batteriflyten resulterer det i en netto overskuddstrøm på 7 377,5 kWh som selges til nettet.

Tabell 4.3: Energiflyt for uke 29

	Solprod. [kWh]	El-behov [kWh]	Opplading		Utlading		Netto [kWh]
			[kWh]	[%]	[kWh]	[%]	
Man	30 630,02	17 549,18	6 215,10	50,19	5 315,49	42,92	-12 181,23
Tirs	8 467,88	17 548,00	699,73	5,65	3 271,18	26,41	6 508,68
Ons	22 773,85	17 546,90	5 102,16	41,20	4 394,71	35,49	-4 519,50
Tors	28 005,17	17 578,06	6 256,99	50,52	4 937,59	39,87	-9 107,71
Fre	9 670,83	17 601,68	813,80	6,57	2 840,65	22,94	5 904,01
Lør	13 608,17	17 120,85	2 559,76	20,67	2 559,76	20,67	3 512,67
Søn	14 200,83	16 706,41	3 399,62	27,45	3 399,62	27,45	2 505,59
Total	127 356,74	121 651,09	25 047,16	202,25	26 719,00	215,75	-7 377,50

4.4.2 Energiflyt kombinert med energilagring i vinteruke

Uke 52 illustrert med Figur 4.15 har nesten ingen produksjon av elektrisitet fra solcellepanelene. I motsetning til uke 25 og 29, bruker uke 52 kjøpt elektrisitet til oppladning av batteriet på natten. I figuren tilsvarende dette det røde arealet under den brune kurven for elektrisk energibehov. Dette resulterer i en positiv batteriflyt i disse timene, som innebærer at opplading finner sted. På dagtid blir denne energien benyttet, med noe høyere utladingsevne i effektkrevende timer enn resterende timer på dagtid.



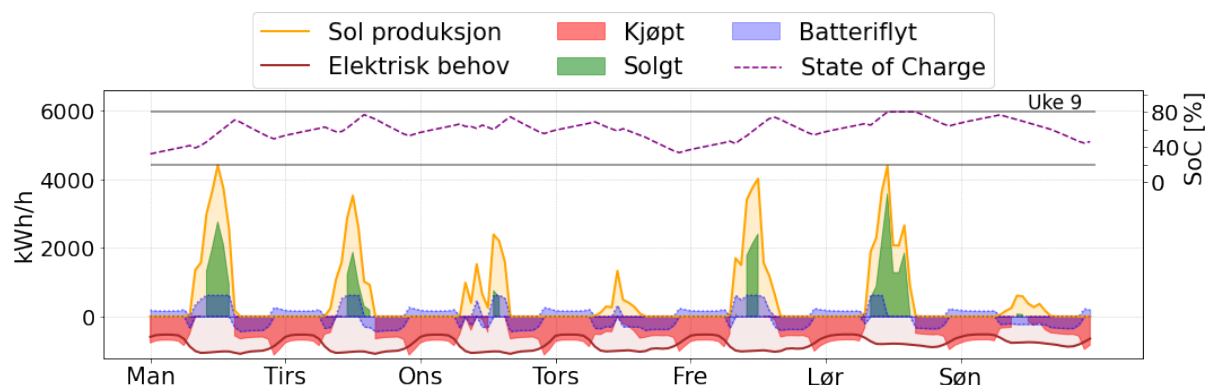
Figur 4.15: Energiflyt kombinert med batteriflyt og SoC i uke 52

Tabell 4.4 viser at ingen av dagene har netto overskuddsstrøm for salg til nettet. Totalt sett har Transittkaia i uke 52 en solproduksjon på kun 253,3 kWh i løpet av uken. Elektrisk energibehov øker i vinterukene og er nå lik 140 567,5 kWh. Sammen med opp- og utlading av batteriet er netto elektrisitetsbehov tilsvarende 140 670,57 kWh i underskudd.

Tabell 4.4: Energiflyt for uke 52

	Solprod. [kWh]	El-behov [kWh]	Opplading		Utlading		Netto [kWh]
			[kWh]	[%]	[kWh]	[%]	
Man	19,79	20 849,03	2 778,89	22,44	2 385,63	19,26	21 222,50
Tirs	19,79	20 852,52	2 779,44	22,44	2 779,70	22,45	20 832,46
Ons	19,79	20 841,50	2 777,86	22,43	2 777,86	22,43	20 821,70
Tors	19,79	20 844,57	2 778,10	22,43	2 778,04	22,43	20 824,85
Fre	39,58	20 849,83	2 778,57	22,44	2 778,46	22,44	20 810,35
Lør	106,86	18 372,69	2 724,14	22,00	2 757,74	22,27	18 232,23
Søn	27,69	17 957,37	2 714,91	21,92	2 718,10	21,95	17 926,48
Total	253,30	140 567,50	19 331,91	156,10	18 975,54	153,23	140 670,57

Uke 9 illustrert med Figur 4.16 er en vinteruke med en større andel solinnstråling. Selv med mer egenproduksjon vil det for denne uken ikke lagres nok energi i batteriet til å forsyne energibehovet over hele natten. I uke 9 kjøpes det også ekstra elektrisitet for opplading av batteriet på natta. Det bidrar til at batteriet kan dekke større deler av energibehovet på dagen. SoC har store variasjoner og viser at batteriet opplades fullt på lørdag, og aldri full utlading.



Figur 4.16: Energiflyt kombinert med batteriflyt og SoC i uke 9

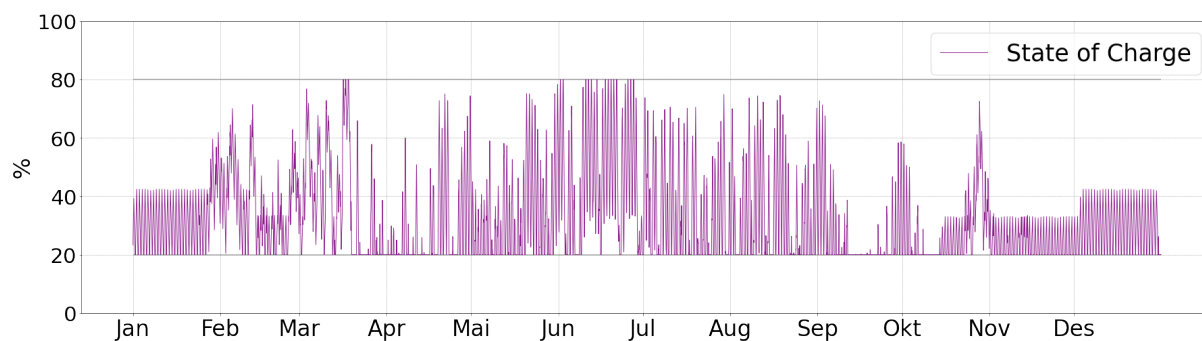
Tabell 4.5 viser at det er kun én dag som totalt har netto overskuddsstrøm, nemlig lørdag med 1 426,76 kWh. Resterende dager har netto underskudd som medfører at det kjøpes mer enn det selges. Totalt sett har Transittkaia i uke 9 solproduksjon på 88 133,91 kWh, og et elektrisk energibehov på 136 729,4 kWh. Sammen med opp- og utlading av batteriet er netto elektrisitetsbehov tilsvarende 50 533,23 kWh.

Tabell 4.5: Energiflyt for uke 9

	Solprod. [kWh]	El-behov [kWh]	Opplading [kWh] [%]		Utlading [kWh] [%]		Netto [kWh]
Man	20 451,89	20 845,93	5 611,94	45,32	3 009,00	24,30	2 996,98
Tirs	13 802,59	20 845,66	4 058,45	32,77	3 631,93	29,33	7 469,59
Ons	10 001,01	20 849,86	3 910,21	31,57	3 594,88	29,03	11 164,18
Tors	3 263,32	19 948,89	1 936,63	15,64	4 666,09	37,68	13 956,10
Fre	17 765,96	19 949,28	5 309,87	42,88	2 807,07	22,67	4 686,11
Lør	20 018,26	17 351,49	3 428,74	27,69	2 188,73	17,67	-1 426,76
Søn	2 830,86	16 938,29	1 556,08	12,57	3 976,48	32,11	11 687,03
Total	88 133,91	136 729,40	25 811,93	208,43	23 874,20	192,78	50 533,23

4.4.3 State of Charge

Figur 4.17 illustrerer SoC til batteriet. Det er som nevnt tidligere fastsatt at SoC er mellom 20 % - 80 %, avgrenset med grå horisontale kurver. Perioden fra februar til november har store variasjoner i oppladning og utlading. Batteriet når full oppladning flest ganger i juni, når det er mye produksjon av elektrisitet. I januar, november og desember er SoC stødig i opp- og utladingen. Denne perioden opplader batterisystemet på natten, og blir lite påvirket av solproduksjon. Vedlegg F presenterer samme graf i et større format for å lettere sammenligne uker.



Figur 4.17: Batteriets SoC gjennom året. Illustrerer oppladning og utladning, inkludert sykluser.

Batterier har en forventet levetid oppgitt i antall sykluser. Full utlading og full opplading, tilsvarer én syklus. Det er henholdsvis det samme som å benytte batteriets halve kapasitet, og så lade opp igjen – to ganger. I løpet av det simulerte året går batteriet gjennom 153 sykluser. Batterispesifikasjonene i Vedlegg D viser en antatt levetid på 5 000 cellesykluser for 25 °C. Det betyr at med likt antall sykluser hvert år vil batteri kunne ha en levetid på over 30 år, uten å ta hensyn til cellenes degradering.

5 Diskusjon

Transittkaia som en del av et nullutslippsområde er et fremtidsrettet og aktuelt forsøk på å utvikle samfunn og infrastruktur for å kunne imøtekomme dagens miljø- og bærekraft-situasjon. Som nasjon har Norge forpliktet seg til klima- og miljømål, i tråd med FNs bærekraftsmål. Samarbeid og bærekraftige tiltak er nødvendig for å nå FNs klimamål om netto-null i klimagassutslipp innen 2050.

Norge har de siste tre årene hatt en kraftig økning i energipriser, og prognoser tyder på at det vil holde seg på et høyt nivå frem mot 2030. Transittkaia forventes ikke å være i driftfasen før den tid, og det er dermed ikke usannsynlig at energiprisene blir redusert. I 2035 forventes havvind og generelt vindkraft å stå for en stor del av den norske og nordiske kraftbalansen. Ved å implementere solkraft vil den variable kraftproduksjonen i større grad være komplementær, og dermed styrke norsk forsyningsikkerhet. Det innebærer også nettforbedringer, samt at utredningsansvarlig nettselskap kontinuerlig tilpasser seg og belyser forventede endringer i KSU-rapportene. Smart strømmnett er på vei til å utfase tradisjonelt strømmnett og behovet for innovative løsninger tilpasset fornybar kraftproduksjon øker. Med en større andel elektrifisering er kraftnettet avhengig av å kunne håndtere større effektbehov og mer lokal energiproduksjon.

Miljødirektoratet sin årlige klimarapport peker på at det er et unødvendig høyt forbruk av energi fra boliger. I forbindelse med pågående oppdrag hos DiBK, vil både byggteknisk forskrift og energikrav videreutvikles for å sikre energieffektiv fremtid. Endringer i slike krav vil bidra på veien mot netto-nullutslipp. Ved å rette fokus fra nullutslipp i bygninger til nullutslipp for områder økes kompleksiteten. Imidlertid vil utviklingen mot lavutslippssamfunn avhenge av at helheten vurderes, da spesielt verneverdige bygninger i mindre grad har mulighet til å innfri strenge energikrav.

Transittkaia som skal stå ferdig anno 2040, forventes å bli bygget og dimensjonert med enda strengere krav enn det som eksisterer per dags dato. Slik Figur 2.7 illustrerer inkluderer ZEB-O kriteriene at energiforbruket skal være dekket av lokal energiproduksjon, og ekskluderer klimautslipp fra materiale, bygging og avhending. Nullutslippsområder har et stort fokus på effektflyt og effekttopper da energistrømmer i et slikt område blir styrt og utvekslet på en fleksibel måte. ZEB skal produsere fornybar energi tilpasset bygningens behov, slik at import og eksport av energi vil minimeres. For verneverdige bygg som skal renoveres kan det være vanskelig å nå ZEB-COM kravene, men i samspill med andre bygg kan målet om nullutslippsområde bli mulig.

På Transittkaia er det laveste og høyeste elektriske energibehovet henholdsvis 487 kWh og 1

324 kWh i løpet av én time. Dette behovet må ikke forveksles med absolutt maksimal effekt. FFR krever eksempelvis mer enn 10 målinger per sekund. Effekt på en så kort tidsperiode vil illustrere langt høyere effekttopper enn det timesbasert energidata gjør.

Det elektriske energibehovet, i timesintervall er tilnærmet identisk gjennom ukene, hvorav det er trinnvise forskjeller basert på årstider, som Figur 4.1 tydelig illustrerer. Det er fire uker i løpet av året som også har store avvik i forhold til resten. Disse knyttes opp mot henholdsvis påske og tre uker fellesferie i sommermånedene, da indeksen til energibehovet er identisk til påsken og sommeren i 2021. Det elektriske energibehovet for BL er betydelig større enn for EE, som er et energieffektivt scenario. For å unngå underdimensjonering av energiforbruket, er BL benyttet som referanse. Dette gir en visuell fremstilling av hvordan solcellepaneler og batterier påvirker energiflyten til Transittkaia. Det elektriske energibehovet har tydelige variasjoner mellom ukedag og helg, illustrert i Figur 4.2.

Det termiske behovet har en større variasjon sammenlignet med det elektriske behovet, illustrert både i Figur 4.3 og Figur 4.4. Dette kommer av at verdiene blir påvirket av ulike utetemperaturer og forbrukeratferd tilknyttet energibruk. For termisk energibehov er variasjonene mindre mellom ukedag og helg, som påvirkes av likt bruksmønstre og preferanser for hele uken. Figuren 4.5 illustrer større variasjoner i termisk energibehov gjennom året, som også underbygger bruksmønstre og behovet for oppvarming med varierende utetemperaturer, visualisert i Figur 2.26.

Lastmodeller er vanskelig å forutse, men kan ved hjelp av verktøyet PROFet gi gode estimater både for elektrisk og termisk energibehov – også for Transittkaia. Tabell 2.1 presenterer at behovet for romoppvarming er litt større i boligblokker enn næringsbygg, mens det el-spesifikke behovet er over tredoblet i bygninger knyttet til næring. Det bidrar til at det elektriske behovet på Transittkaia i langt større grad blir påvirket av næringsbygg.

Solinnstråling påvirkes av naturlige variasjoner i vær og klimatiske endringer. Innstråling forventes å avvike i liten grad fra historisk data. For å kunne illustrere effektforskjellene i løpet av ett år, er solinnstrålingsdata hentet fra 2020. Figur 4.6 viser at flere år ligger nære gjennomsnittet, men på grunn av relevans til dagens teknologi benyttes nyere data som er relativt lik gjennomsnittet.

En lav gjennomsnittstemperatur for Trondheim påvirker solcellepanelets effektivitet. Selv med liten solinnstråling vinterstid vil det kalde klima gi en økt effekt for panelet. Antall nedbørsdager påvirker også mulig innstråling, men er vanskelig å si noe om konkret påvirkning dette har for solcellepanelet. For å kunne utnytte mest mulig av solinnstrålingen er det nødvendig å kartlegge behov tidlig i planleggingsfasen. Gjennomtenkt planløsning vil optimalisere utnyttelsen

av solenergien, både gjennom plassering av solcellepanel og passive tiltak, illustrert i Figur 2.6. Inkludert i virkningsgraden til solcellepanelet er faktorer som helning, vinkel og Trondheims temperaturer tatt hensyn til. For å videre planlegge solpanelareal er det tatt hensyn til at enkelte deler av takareal på Transittkaia vil dekkes av tekniske installasjoner og takterrasser. Data fra ZEB-laboratoriet illustrerer i Figur 4.9 et stort potensial for enkelte fasader, i tillegg til tak og pergola. Tak og pergola er begge vendt mot sør og har en helningsvinkel som er mer optimalisert enn solcellepanelene på sørfasaden. Dermed vil solceller på tak og en pergola utnytte soltimene og innstrålingen i større grad. Ved å sammenligne grafene for de ulike fasadene med solcellepanel vendt i ulike himmelretningene, kommer det tydelig fram at sørfasaden har høyest solinnstråling. Dette samsvarer med at solen går opp i øst og ned i vest, og ettersom Trondheim er nord for ekvator vil dette føre til at nordfasaden får minimalt med solinnstråling. Figur 4.7 illustrere at sola er særlig lav om vinteren, spesielt i Trondheim som ligger omtrent 65°N . Det gjør at nevnte fasader bør prioriteres for solproduksjon når også lokale skyggeforhold tas hensyn til.

Lokal elektrisk energi på Transittkaia vil utelukkende bli produsert av solcellepanel. Solproduksjonen er i hovedsak avhengig av to faktorer; selve solpanelet, samt mengde innstråling som treffer panelet. Det finnes flere solcelleteknologier til ulike bruksområder, hvor det for Transittkaia i hovedsak er antatt monokrystallinsk solcellepanel. Disse panelene har en høyere virkningsgrad, men er mer energikrevende og kostbare sammenlignet med andre solcelleteknologier. Monokrystallinske solcellepaneler er mye utbredt og er en teknologi som forventes å bli rimeligere og utviklet teknologi med økt effektivitet.

For sommerdager både med og uten skydekke, samt for store deler av våren og høsten vil solproduksjon dekke store deler av energiforbruket. Figur 4.11 presenterer nettopp dette, og illustrerer samtidig potensialet for solgt elektrisitet. Investeringskostnadene for solcellepaneler er relativt høye, men forventes å falle i pris i takt med teknologiutvikling og økt utbredelse av slike tiltak. Sommermånedene på Transittkaia bærer preg av store mengder solproduksjon. Figur 4.10 viser at tilnærmet hele sommeren har et overskudd i netto energi. Ettersom forbrukere selv kan dekke eget energibehov og i tillegg selge overskudd tilbake til strømmettet, vil solcellepanel være et tiltak som forventes å være lønnsomt i lengden.

Vinterukene er i større grad preget av minimalt med solproduksjon. Under de mørkeste vinterukene vil soltimene være få, samtidig som snødekte panel kan være en betydelig faktor. Figur 4.12 presenterer både en vinteruke med minimal solproduksjon, samt en vinteruke med betraktelig mer solproduksjon. Summen av solinnstrålingen per uke er plottet for sammenligning i Figur 4.10 og illustrerer store forskjeller i solproduksjon i vinterhalvåret. I løpet av uke 9

som har betraktelig mer solproduksjon, vil overskuddsstrøm kunne selges tilbake til nettet. Solcellepanelene vil i tillegg ha ekstra fordel av albedo-effekten, både fra nærliggende sjø og snødekte arealer ved Transittkaia.

Energilagring gjennom LIB har stort potensiale mye på grunn av høy fleksibilitet, fallende priser og kontinuerlig teknologiutvikling. LIB er godt egnet for forbrukere da det krever lite vedlikehold. I tillegg er LIB en velegnet teknologi til flere ulike bruksområder, avhengig av katodemateriale. For BESS er LFP et godt alternativ til katodematerialer, med sin høye ytelsesevne og utholdenhet. Slike egenskaper vil kunne bidra med både frekvensutjevning, energi-arbitrasje, og balansering av kraftproduksjon. For Transittkaia vil det være fordelaktig å plassere flere batteripakker i parallell for å øke strømmen og dermed den nominelle kapasiteten. Plassering av BESS må planlegges og være gjennomtenkt for å ta hensyn til brannsikkerhet.

Kombinasjonene av flere tiltak som blant annet solcellepanel, VP og energilagring er et voksende marked med stort potensiale. Kombinasjonen av flere tiltak vil kunne gi en mer lønnsom forretningsmodell da flere tiltak vil bidra til økt energieffektivitet, fleksibilitet og forsyningssikkerhet. Energiflyten til Transittkaia endrer seg en god del etter implementeringen av batteri. Implementering av batteriteknologi i kraftnettet viser til fordeler som energi-arbitrasje, reduisering av effekttopper og økt fleksibilitet. Transittkaia vil få økt fleksibilitet og selvstendighet ved å kunne utnytte energilagring og styre energibruken etter behov.

Figur 4.13 og Figur 4.14 illustrerer god utnyttelse av batteriet i sommermånedene. Ved å justere maksimal C-rate på dagtid sørger utnyttelsen for at batteriet ikke tilbringer lange perioder med maksimal SoC. Det gjør det lettere å utnytte pris og effektforskjeller, også på sommeren. Det er store mengder overskuddsstrøm som selges i løpet av sommerhalvåret. I forenklingen blir ikke oppladningsevne utnyttet til det maksimale, fordi det ikke er ønskelig å opp- og utlade batterisystemet fullstendig. Det vil påvirke SoH negativt. Avhengig av størrelse på batterisystemet bør seriekoblinger og parallellkoblinger kobles om hverandre for å oppnå ønskede spesifikasjoner. Styringssystemer vil videre avgjøre utnyttelsen av BESS. Optimal styring tar høyde for alle tilgjengelige parametre for å optimalisere levetid, sikkerhet og kostander.

Videre presenterer Figur 4.15 og Figur 4.16 to vinteruker med implementert batteri. Førstnevnte uken har under 0,2 % av energibehovet dekket av solproduksjon. Her blir det dermed kjøpt energi på natten for å dekke effektkrevende timer på dagen, for økonomisk gevinst. Uten ekstra kjøp vil BESS ligge konstant på minimal SoC-verdi i de mørkeste vintermånedene. Figur 2.2 illustrerer en markant økning i spotprisen i vintermånedene, i tillegg til at også nettleie vil øke grunnet større energiforbruk. Det forsterker potensialet til energi-arbitrasje og dermed den potensielle økonomiske gevinsten. Figur 4.17 synliggjør den mer konstante opp- og utladningen

i vintermånedene hvor solproduksjon er minimal. I sommermånedene er SoC i mye større grad variabel i takt med solinnstrålingen. Forenklingen i vintermånedene illustrer arbitrasjen de smarte styringsystemer automatisk vil gjøre gjennom hele året.

For å dekke energibehovet på Transittkaia ble det valgt 6 batteripakker i parallellkobling med valgt type batteri. Dette er en batteritype som er tilgjengelig og moden på markedet og kan være et alternativ for området. LFP tolererer drift med SoC-intervall på 15 % - 100 %, for BESS på Transittkaia er det satt et SoC-intervall på 20 % - 80 % for å ivareta batteriets egenskaper. Antall sykluser i det simulerte året gir en realistisk levetid i forhold til dagens batteriteknologi dersom det videre tas hensyn til degradering. Det kan bety at BESS eventuelt kan benyttes hyppigere enn det denne analysen har gjort.

Styringsalgoritmer og modellprediktiv regulering vil mest sannsynlig ha et høyt TRL-nivå når Transittkaia skal ferdigstilles. Da vil den intelligente styringen sørge for enda større grad av optimalisering rundt energibruk og lagring. Med analysen sin optimistiske solproduksjon er det til tross for BESS – med relativ stor kapasitet, fortsatt mye overskuddsenergi. Fleksibilitet i kraftsystemet er videre et av momentene som både KSU, i tillegg til diverse NVE-, Statkraft- og LO-rapporter belyser som et viktig moment i fremtidens kraftsituasjon. Energilagringsteknologier som LIB, flytbatterier, termisk lagring og hydrogen vil bidra til slik fleksibilitet.

Norges kraftmiks består i stor grad av fornybar kraftproduksjon, noe som skaper usikkerhet om miljøfordelene ved batteriinvestering sammenlignet med å selge strøm direkte tilbake til kraftnettet. Energilagring gjennom batterier er relativt dyrt og medfører også store miljøpåvirkninger i produksjon. Smart styring av energibruken har muligheten til å bidra med mange av de samme tjenestene som et batteri. Med lavere kostnader for smart styring i dagens marked vil dette være en stor konkurrent for investering av batteri for forbruker. Markedet for batteri kan likevel bli lønnsomt mot år 2030 med fallende priser og forventet forbedring i virkningsgrad og levetid.

Analysen for Transittkaia har resultert i en overskuddsproduksjon fra solcellepanel som planlagt batteriteknologi ikke har kapasitet til å lagre. Analysen har kun vurdert elektrisitetsbehovet. I praksis er det et termisk behov som også skal dekkes, og fra sluttrapporten er det antatt at et sesongvarmelager dekker dette. Dermed vil overskuddsproduksjonen fra solproduksjon som ikke lagres i batteriet kunne benyttes til å levere energi til blant annet sesongvarmelageret.

Nyhavna Utvikling AS som prosjekterer utviklingen av nullutslippsområdet har publisert en sluttrapport som presenterer planlagte og mulige energisystemer for området. Blant disse er solcellepaneler, batterilagring, geotermos, VP, smart lading og fjernvarme. Fjernkjøling er også

et energisystem som har potensiale for god utnyttelse av energi da Trondheimsfjorden kan være en god energikilde, spesielt ettersom teknologien er svært energieffektiv. Et nytt fjernkjølesystem vil kreve en planlagt plassering og medfølger muligens nye naturinngrep.

Behovet for å forbedre sirkulær økonomi og bærekraftige verdikjeder er viktig i utviklingen mot et nullutslippssområde. Norge har gode forskningsmiljøer og solcelleteknologi er i stadig utvikling. Utvinningen av ren silisium medfører miljøutfordringer, derimot er norskprodusert silisium blant de mest miljøvennlige globalt. Det grønne skiftet krever strengere krav til produksjon, resirkulering og gjenbruk av batterier. Norge har inngått flere grønne industripartnerskap for å rette oppmerksomhet mot sirkulær økonomi og bærekraftige løsninger. Batteriforordningen fra 2023 fremmer bærekraftige batterier gjennom hele livssyklusen. Denne forordningen vil være med på å redusere miljøbelastningen, forbedre arbeidsforhold, skape et mer bærekraftig batterimarked og øke bevisstheten hos forbruker.

Samfunnets normer, regler, verdier og holdninger er med på å påvirke forbruket og til hvilken grad et samfunn klarer å bli et lavutslippssamfunn. Samarbeid og delingsløsninger er et viktig tiltak i utviklingen av det grønne skiftet. Mulighetene for å kunne dele overskuddsstrøm med nærliggende områder vil redusere behovet for import av strøm og det vil bidra til reduserte kostnader. Ulempen med slik delingsløsning i dag er kostnader tilknyttet salg av strøm og tariffer. Den politiske sfæren setter per dags dato begrensninger i delingsløsninger, ettersom lovverket ikke utvikler seg i takt med teknologien. Sambruk mellom bolig og næringsbygg har potensial til å kunne utnytte energien i større grad. Næringsbygg har høyere energibehov på formiddagen enn det boliger har, og motsatt. Det vil dermed være et energieffektivt tiltak å koordinere energibruk og lagring mellom næringsbygg og boliger basert på varierende energibehov.

Oppdaterte delingsløsninger er nødvendig for å kunne bruke energien på en mest effektiv og bærekraftig måte. Høsten 2023 kom det en oppdatert delingsløsning som viser at tiltak vurderes, men at oppdateringer forventes for å kunne optimalisere energibruken. Plusskundeavtale for overskuddsvarme, som foreslås i handlingsplanen for energieffektivisering fra OED, er et interessant tema som i økende grad blir viktigere for flere aktører. SINTEF har blant annet innspill som omhandler at overskuddsvarme kan sendes tilbake fjernvarmenettet.

Den politiske sfæren kan skape konflikter med den personlige sfæren dersom nødvendige samfunnssteg forhindres eller prioriteres annerledes enn befolkningen ønsker. Dette er spesielt gjeldende, ettersom bevissthet på bærekraft og utvikling er større enn tidligere. For å sikre at samfunnet følger utviklingen er det viktig å oppdatere lovverket, spesielt med tanke på utvikling rundt ZEN. Pilotprosjektet *Ydalir* underbygger at lovverket ikke er tilstrekkelig tilpasset utviklingen mot et nullutslippssamfunn, og fremmer behovet for justeringer for å sikre

bærekraftig utvikling.

Støtteordning for elektriske biler har vist at forbrukere kan ta bærekraftige valg i retning det grønne skiftet. Den økte utbredelsen i antallet elektriske biler etter offentlig støtte har fått frem potensialet som ligger i handlekraft når kostnadsrelaterte støtteordninger er til stedet. Dette gir økt oppmerksomhet og belyser behovet for utvidet støtteordning for energieffektive tiltak.

5.1 Usikkerheter i prosjektet

Grunnet oppgavens omfang som kun tar hensyn til det elektriske behovet vil analysen være delvis urealistisk for prosjektets helhet. Det medfører flere usikkerheter. Flere antagelser i denne oppgaven har basert seg på tall som allerede er beregnet for hele Nyhavna-prosjektet. Det vil være usikkerhet knyttet til dette ettersom det er antatt at Transittkaia tilsvarende 25 % av hele Nyhavna, som arealet for solcellepanelene har blitt beregnet ut fra.

Termisk energibehov står for en stor andel av det totale energibehovet, og vil dermed medføre en stor usikkerhet at dette ikke er beregnet. I praksis vil energieffektive tiltak som ikke er vurdert i denne analysen, som blant annet VP og fjernvarme, ha innvirkning på energiflyten.

Antagelsen om at bygningene for området er optimalisert for solinnstråling medfører noe usikkerhet. Dette kommer av at høyden på bygningene mest sannsynlig vil variere og det i tillegg vil være lokale skyggeforhold som reduserer innstråling enkelte steder. Antatt virkningsgrad og antatt optimal vinkling på panelene vil medføre usikkerheter. I realiteten vil det være ulik virkningsgrad for fasadene, og panelene vil være tilpasset flater og dens himmelretning.

Beregninger på energiflyt tar ikke med lokale svinginger grunnet timesbasert data. Dette medfører at figurene ikke visualiserer at det i realiteten vil bli kjøpt og solgt elektrisitet i sanntid. Variasjonene kan være store fra minutt til minutt. Nøyaktigheten av SoC påvirkes videre av varmetap og andre ineffektivitetstap, ettersom noe energi som tilføres under oppladning ikke vil bli lagret i batteriet.

5.2 Videre arbeid

For å bygge videre på denne oppgaven, ville det vært relevant å undersøkt det totale energibehovet for Transittkaia, inkludert det termiske behovet. Dette vil gi en mer helhetlig forståelse for energibruk og mulighetene for ytterligere integrering av energisystemer og tiltak.

Energikravene i TEK-17 spesifiserer at en bygning med et bruksareal større enn 1 000 m² skal ha fleksible varmesystemer som dekker minst 60 % av varmebehovet. Dette gjør termiske energisystemer ikke bare anbefalt, men også nødvendig. Nyhavna har planlagt sesongvarmelager, hvor geotermosen er tiltenkt å dekke tilnærmet hele varmebehovet. Overskuddsenergien fra

sommermånedene, spesielt i kombinasjon med Statkraft sin planlagte sjøvarmepumpe, vil også bidra til dette. Termisk lagring kan også være nyttig for å avlaste mer lokale effekttopper gjennom året, hvor teknologi som PCM har stort potensial. Muligheten for å lagre varme i sesongvarmelager og teknologier som PCM, gjør at overskuddsenergien som produseres på Transittkaia kan utnyttes effektivt. Det termiske behovet er omfattende nok til å kunne utgjøre en hel studie alene og bør derfor prioriteres for å oppnå et helhetlig system.

I tilknytning sesongvarmelageret vil en storskala VP bidra til å levere tilstrekkelig termisk energi til lagring og spesielt effektkrevende perioder. Sjøvarmepumpe er en teknologi med stort potensiale som på Transittkaia vil kunne utnyttes godt i tilknytning Trondheimsfjorden. Ved at VP er tilknyttet det kommunale fjernvarmenettet kan den levere ytterligere energi til Trondheim selv når Transittkaia ikke har behov for det. Slike avtaler vil være gunstig for både effektiviteten på energisystemet, kraftnettet, samt lønnsomheten. Det elektriske energibehovet bør også ha slike avtaler eller alternative løsninger. Styringssystemet som benyttes bør kunne implementere flere alternativer som kan nytte seg av overskuddsenergi, avhengig av hva som er lønnsomt. Utveksling med Energihub Brattøra og overliggende nett er et alternativ.

Batteriforordningen vil bidra til et løft for batterienes verdikjede. Det vil være av stor interesse å se videre på ulike materialer og batteriteknologi som vil være mest hensiktsmessig for stasjonært bruk i forbindelse med nullutslippsområder. Blant flere har flytbatteri stort potensiale og stor vekst i batterimarkedet.

Klassifisering av ambisjonsnivå for ZEB er videre essensielt for å vurdere om det totale området innfrir krav til et ZEN, for materialer, bygging, drift og avhending. KPI'er vurdert av flere relevante aktører innenfor ulike fagfelt må sammen vurdere hvordan ønsket klassifisering kan nås. Teknologier med moderate TRL-nivå er også verdt å kartlegge. Transittkaia er lokalisert i nærheten av store forskningsmiljø ved SINTEF, NTNU og FME ZEN som gjør at området i seg selv er utmerket for implementering av innovative og fremtidsrettede løsninger.

6 Konklusjon

Trøndelag skal bli klimanøytral innen 2030 og må være delaktig i utviklingen av det grønne skiftet. Med økende oppmerksomhet og strengere krav rundt globale og nasjonale klimamål, har energieffektive bygg og implementering av fornybar energi blitt stadig viktigere. Dette prosjektet har analysert Transittkaia som delområde i utviklingen av Nyhavna mot å bli et nullutslippsområde, ved implementering av bærekraftige og energieffektive tiltak.

Når fokuset flyttes fra et enkelt bygg til et større område øker kompleksiteten og flere aktører involveres. ZEN muliggjør samspill og deling av energiresurser som vil gi positivt utslag for både kraftnettet og den enkelte forbrukers økonomi. Målsetningen for et slikt område er å redusere både direkte og indirekte klimagassutslipp. Energieffektivisering og energiproduksjon er noen av de viktigste tiltakene for å kunne tilfredstille kravene for et nullutslippsområde. Løsningene som implementeres på Transittkaia skal kunne utnytte energi både effektivt og bærekraftig. Området skal i all hovedsak dimensjoneres etter nyeste krav og anbefalinger. Termisk energibehov står for en betydelig større del enn det elektriske behovet på Transittkaia. Dette fremhever viktigheten av en helhetlig forståelse for hvordan energisystemer og tiltak påvirkes av både varme og elektrisitet. Det er imidlertid viktig å merke seg at oppgaven kun vurderer det elektriske behovet.

Solpotensialet må tidlig inkluderes i planleggingen for å sikre optimal utnyttelse. Anslått solpanelareal og virkningsgrad resulterer i høy utnyttelse av takareal og solvendte fasader. Gjennomtenkt plassering av solpanel kan ha bedre effektiviteten og produksjonen på fasader enn tak i mindre perioder. Høy utnyttelse av solinnstrålingen bidrar til stort energioverskudd, spesielt i solfylte måneder.

Energilagring deles inn i teknologier med kortsiktig og langsiktig lagringsevne. Termisk energi egner seg godt til sesonglagring, mens batterilagring utnytter kortsiktige fordeler. På Transittkaia er egenskaper som kapasitet og sikkerhet prioritert, og LFP er dermed et lovende katodematerial i LIB. Et slikt batteri vil kunne utnytte energiarbitrasje og bidra til lastforskyvning. Styringssystemer som tar slike valg vil ha et høyt TRL-nivå frem mot når Transittkaia ferdigstilles. Kompleksiteten er i dag stor, men vil i seg selv utgjøre stor nytteverdi. Energiltak som muliggjør lagring av energi øker fleksibiliteten ved å kunne benytte seg av grønn energi, selv under perioder med lav egenproduksjon. Kombinasjonen av flere energisystemer vil øke fleksibiliteten og være fordelaktig ettersom variabel kraftproduksjon kan belaste strømmettet betydelig. Kombinert med batterilagring kan derimot solenergi lagres istedenfor å overføres til nettet, noe som bidrar til et mer stabilt og pålitelig kraftsystem.

Et bærende element for nullutslippsnabolag er at klimagassutslippet tilnærmes null.

Energisystem som solcellepanel og batterilagring er ikke uten klimagassutslipp. Solcellepanel produserer energi gjennom fornybar kraft, men har utslipp knyttet til produksjon. Det har også batterier, men i lys av batteriforordningen er denne teknologien i utviklingsfasen mot en mer bærekraftig verdikjede. For å bidra til bærekraftig samfunnsutvikling er det essensielt at lovverk og krav oppdateres i takt med teknologisk utvikling. Teknologi og praksis må være i tråd med bærekraftige standarder, innovasjon må fremmes og det må investeres i grønn teknologi. Klare retningslinjer og tilpassede støtte- og delingsordninger er nødvendige for å bidra til global reduksjon av miljøpåvirkningen.

Økt bevissthet og implementering av energieffektive løsninger bidrar til en strukturert og forutsigbar ramme for bærekraftig utvikling, samt klimavennlig og økonomisk vekst. Behovet for et fleksibelt og forsyningssikkert strømmnett blir stadig mer påtrengende. Prosjektering av et nullutslippsområde er avhengig av gjennomtenkte løsninger både for plassering av energieffektive tiltak og kombinasjonen av dem. Videre forskning og analyser vil være nødvendig for å optimalisere disse løsningene og sikre en vellykket overgang til et lavutslippssamfunn.

Utviklingen av Transittkaia har et stort potensiale for å kunne implementere bærekraftige og energieffektive løsninger. Gjennom implementering av solcellepaneler kombinert med energilagring i batterier, vil import av elektrisitet reduseres og tiltakene vil bidra til å optimalisere kraftnettet. For utviklingen av området vil det være optimalt om energibesparende tiltak tas med i planleggingen fra start. Langsiktig energi- og kostnadsbesparelse starter i prosjekteringsfasen, hvor redusert forbruk understreker prinsippet; Den mest miljøvennlige energien er den som ikke brukes.

Referanser

- [1] Trøndelag fylkeskommune. *Handlingsplan for klimaomstilling 2021-2023*. 2020. URL: <https://www.trondelagfylke.no/contentassets/4ac3e1bb2dc94358b0c28b83b205770f/handlingsplan-for-klimaomstilling-2021-2023.pdf>. (hentet: 08.05.2024).
- [2] Thomas Keilman. *Bygger bedre kunnskap for en mer bærekraftig byggebransje*. 2024. URL: <https://www.forskningsradet.no/sok-om-finansiering/hvem-kan-soke-om-finansiering/naringsliv/prosjekter-naringslivet/bygger-bedre-kunnskap-for-en-mer-barekraftig-byggebransje/>. (hentet: 08.05.2024).
- [3] European Commission og Directorate-General for Energy. *Clean energy for all Europeans*. Publications Office, 2019. DOI: doi/10.2833/9937.
- [4] *Parisavtalen*. 2023. URL: <https://fn.no/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen>. (hentet: 15.04.2024).
- [5] *Norges 24 klima- og miljømål*. URL: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/miljomaal/>. (hentet: 15.04.2024).
- [6] FN-sambandet. *FNs bærekraftsmål*. 2024. URL: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal>. (hentet: 13.05.2024).
- [7] Strømsnes Røe AS. «Bærekraftsstrategi for Nyhavna Utvikling for 2023-2026». I: (2023).
- [8] Miljodirektoratet. «Klimatiltak i Norge: Kunnskapsgrunnlag 2024». I: (2024).
- [9] Trondheim kommune. «Klimaløftene - Kommunedelplan for energi og klima 2024-2030». I: (2024).
- [10] Geir Molnes og Eva Akerbæk. *Dette må du vite om strømprisene*. 2021. URL: <https://www.faktisk.no/artikler/zl9dw/dette-ma-du-vite-om-stromprisene>. (hentet: 19.03.2024).
- [11] Jon Gustav Kirkerud mfl. *LANGSIKTIG KRAFTMARKEDSANALYSE 2023*. 25. 2023. URL: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2023/rapport2023_25.pdf. (hentet: 24.04.2024).
- [12] Forbrukerrådet. *Spotpriser*. 2024. URL: <https://www.forbrukerradet.no/strompris/spotpriser>.
- [13] Nils Kristian Nakstad mfl. *Nett i tide – om utvikling av strømmettet*. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/9dabbb7fb58e4bb297f4388696570460/no/pdfs/nou202220220006000dddpdfs.pdf>. (hentet: 19.03.2024).
- [14] Nina Holck Sandberg mfl. *ENERGISPAREPOTENSIALET I BYGG FRAM MOT 2030 OG 2050*. 2023. URL: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/3083980/ZEN%2bRapport%2b50.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. (hentet: 01.05.2024).

- [15] Landsorganisasjonen i Norge (LO Norge) og Næringslivets Hovedorganisasjon (NHO). *Kraftløftet*. 2023. URL: <https://www.lo.no/contentassets/d760d8ebcd27421481e666c4fae8af01/kraftloftet-trondelag---regionalt-kunskapsgrunnlag.pdf>. (hentet: 19.03.2024).
- [16] Statnett. «Ny industritilknytning i Midt-Norge krever økt kraftproduksjon». I: (2022). URL: <https://www.statnett.no/om-statnett/nyheter-og-pressemeldinger/nyhet-sarkiv-2022/ny-industritilknytning-i-midt-norge-ma-folges-opp-av-okt-kraftproduksjon/>. (hentet: 19.03.24).
- [17] Statnett. *Områdeplan Midt*. 2023. URL: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/planer-og-analyser/omradeplaner/midt/omradeplan-midt.pdf>. (hentet: 19.03.2024).
- [18] Dalibor Vagner mfl. *Kortsiktig Markedsanalyse 2023-28*. 2023. URL: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/planer-og-analyser/kma/kortsiktig-markedsanalyse-kma-2023-2028.pdf>. (hentet: 19.03.2024).
- [19] Tensio TS. *Kraftsystemutredning for Sør-Trøndelag – Hovedrapport*. 2022. URL: <https://braa.icdn.no/media/dokumenter/rksu2022-sor-trondelag-hovedrapport.pdf>. (hentet: 19.03.2024).
- [20] Enova. *Årsrapport 2023*. 2023. URL: <https://2023.enova.no/>. (hentet: 01.05.2024).
- [21] Statkraft. *Lavutslippsscenario Norge*. 2023. URL: <https://www.statkraft.no/globalassets/0/.no/7-kampanjer/lavutslipp/2023/statkraft-lavutslippsscenario-norge-2023.pdf>. (hentet: 02.05.2024).
- [22] Lars Sjørgard mfl. *Mer av alt – raskere, Energikommisjonens rapport*. 2023. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/5f15fcec3143d1bf9cade7da6afe6e/no/pdfs/nou202320230003000dddpdfs.pdf>. (hentet: 19.03.2024).
- [23] NVE. *Kraftproduksjon*. 2024. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/kraftproduksjon/>. (hentet: 06.05.2024).
- [24] Knut Samdal. *Smart Grids*. URL: <https://www.sintef.no/en/sintef-research-areas/smart-grids/>. (hentet:19.03.2024).
- [25] Chr. Lamnatou, D. Chemisana og C. Cristofari. «Smart grids and smart technologies in relation to photovoltaics, storage systems, buildings and the environment». I: *Renewable Energy* 185 (2022), s. 1376–1391. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.019>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121015883>.
- [26] Smartgrid.gov. *The Smart Grid*. URL: https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_grid.html. (hentet: 19.03.2024).

- [27] Direktoratet for byggkvalitet. *Byggteknisk forskrift (TEK-17) med veiledning*. 2017. URL: <https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17>. (hentet: 18.02.2024).
- [28] Standard Norge. *Klimagassberegninger for bygninger - NS 3720*. URL: <https://standards.no/fagomrader/energi-og-klima-i-bygg/bygningsenergi/klimagassberegninger/>. (hentet: 21.03.2024).
- [29] DiBK. *Innspillsmøte: Mulige endringer i energikrav*. 2024. URL: <https://www.dibk.no/om-direktoratet-for-byggkvalitet/Kalender-DiBK/innspillsmote-mulige-endringer-i-energi-og-klima-i-bygg/>. (hentet: 13.05.2024).
- [30] UngEnergi. *Energivennlig bolig – fremtidens hus*. 2022. URL: <https://ungenergi.no/miljoteknologi/bygg/energivennlig-bolig-fremtidens-hus/>. (hentet: 01.05.2024).
- [31] Enova. *Endringer i energimerkeforskriften 1.mars 2024*. 2024. URL: <https://www.enova.no/energimerking/nyheter1/enderinger-i-energimerkeforskriften-1-mars-2024/>. (hentet: 13.05.2024).
- [32] Byggforskserien. *Lastprofiler og lastvarighetskurver for ulike bygningskategorier*. 2023. URL: https://www.byggforsk.no/nyheter/2/lastprofiler_og_lastvarighetskurver_for_uliike_bygningskategorier/1667. (hentet: 14.05.2024).
- [33] Gunnar G. Løvås. «Fleksibilitet som kilde til verdiskaping og forretningsutvikling». I: (2023).
- [34] Emi Bertoli mfl. *Demand response*. 2023. URL: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/demand-response>. (hentet: 01.05.2024).
- [35] Datatilsynet.no. *Automatisk strøm- og vannmåling*. 2018. URL: <https://www.datatilsynet.no/personvern-pa-ulike-omrader/overvaking-og-sporing/strommaling/>. (hentet: 19.03.2024).
- [36] Hallgeir Horne, Magnus Buvik og Jarand Hole. «Smarte ladesystemer og Vehicle-to-Grid». I: (2019).
- [37] Enova. *Om Enovatilskuddet*. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/om-enovatilskuddet/>. (hentet: 01.05.2024).
- [38] Geir Ringen Nina Due Gro Klæboe. *Fremskrivning av energiforbruk 2020*. URL: https://www.enova.no/upload_images/FCCA5310B4F44DE0955620AD5B0B8A77.pdf. (hentet: 30.04.2024).
- [39] Enova. *Kjøling av boliger og bygg med fjernvarme*. 2023. URL: <https://www.enova.no/privat/anbefalte-energitiltak-for-ditt-hus/bygge-nytt-hus/>. (hentet: 01.05.2024).
- [40] Vilde Christin Skildrud. *Hva bruker mest strøm?* 2023. URL: <https://www.otovo.no/blog/strom/hva-bruker-mest-strom/>. (hentet: 30.04.2024).

- [41] ZEB-laboratoriet. 2022. URL: <https://ungenergi.no/2021/03/10/14163/>. (hentet: 09.04.2024).
- [42] Tor Helge Dokka mfl. «Kriterier for passivhus- og lavenergibygg - Yrkesbygg». I: (2009).
- [43] Tekna.no. *Hva er kravene til passivhus?* 2021. URL: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/krav-til-passivhus/>. (hentet:13.03.2024).
- [44] Geoff Stapleton og Susan Neill. *Grid-connected solar electric systems: the earthscan expert handbook for planning, design and installation*. Routledge, 2012.
- [45] ZEB lab. *PROJECT INFO*. URL: <https://zeblab.no/projectinfo>. (hentet:03.04.2024).
- [46] ZEB centre. *ZEB - definitions*. 2024. URL: <http://www.zeb.no/index.php/en/about-zeb/zeb-definitions>. (hentet:13.03.2024).
- [47] Terje Jacobsen. *ZEB - Zero Emission Buildings*. 2014. URL: <https://www.sintef.no/prosjekter/2010/zeb-zero-emission-buildings/>. (hentet:13.03.2024).
- [48] Trondheim kommune. *Miljøprogram for Nyhavna - energi og klima*. 2020. URL: https://www.trondheim.kommune.no/globalassets/10-bilder-og-filer/10-byutvikling/byplankontoret/1b_off-ettersyn/2020/kvalitetsprogram-for-nyhavna/5-miljo-program-for-nyhavna--energi-og-miljo.pdf. (hentet: 31.03.2024).
- [49] Byplankontoret for Trondheim kommune. *Kvalitetsprogram for Nyhavna - Ti strategiske virkemidler for utviklingen av en sentrumsbydel på Nyhavna*. 2022. URL: https://www.trondheim.kommune.no/globalassets/10-bilder-og-filer/10-byutvikling/byplan-kontoret/1d_kunngj-annet-plan/2022/kvalitetsprogram-for-nyhavna/kvalitetsprogram-for-nyhavna-vedtatt-19.05.22.pdf. (hentet: 02.04.2024).
- [50] NVE. *Modell for deling av overskuddsproduksjon*. 2024. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/kunde/stroemnett/prosumenter-og-plusskunder/modell-for-deling-av-overskuddsproduksjon/>. (hentet: 01.05.2024).
- [51] Enova SF. «Det norske lavutslippssamfunnet etter 2050.» I: *2017:3* (2017). (hentet: 01.05.2024).
- [52] Karen O'Brien. *Hvordan kan vi få til endringer som er bærekraftige og rettferdige?* 2023. URL: https://dnva.no/sites/default/files/files/2023-12/OBrien_Hvordan%20kan%20vi%20f%C3%A5%20til%20endringer_1%20Nov%202023.pdf. (hentet: 19.05.2024).
- [53] Revisorforeningen. *Salg av overskuddsstrøm fra eget solcelleanlegg*. 2024. URL: <https://www.revisorforeningen.no/fag/nyheter/salg-av-overskuddsstrom-fra-eget-solcelleanlegg/>. (hentet: 01.05.2024).
- [54] Stian Backe. *Derfor lønner det seg å bruke strømmen fra solcellene selv*. 2021. URL: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/derfor-lonner-det-seg-a-bruke-strommen-fra-solcellene-selv/>. (hentet: 01.05.2024).

- [55] Magnus Blaker. *Skatteetaten mener solcelle-eiere må skatte av strømmen de sender ut på strømmettet*. 2023. URL: <https://www.nettavisen.no/okonomi/solcelle-eiere-kan-fa-skattebombe-sjokkert/s/5-95-1534570>. (hentet: 01.05.2024).
- [56] Anne-Lise Aakervik (NTNU) mfl. *Årsrapport 2022*. 2022. URL: https://fmezen.com/wp-content/uploads/2023/04/NTNU_ZEN_AnnReport2022web-1.pdf. (hentet: 19.03.2024).
- [57] Marianne Kjendseth Wiik (sintef community) mfl. «NULLUTSLIPPSOMRÅDER I SMARTE BYER Definisjon, vurderingskriterier og nøkkelindikatorer Versjon 5.0. Norsk». I: (2024).
- [58] Marianne Kjendseth Wiik mfl. *NULLUTSLIPPSOMRÅDER I SMARTE BYER Definisjon, vurderingskriterier og nøkkelindikatorer Versjon 4.0*. 2022. URL: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/3043360/ZEN%2bReport%2bno%2b46.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (hentet:18.03.2024).
- [59] Marianne Kjendseth Wiik mfl. *ZERO EMISSION NEIGHBOURHOODS IN SMART CITIES Definition, key performance indicators and assessment criteria Version 1.0*. 2018. URL: <https://fmezen.no/wp-content/uploads/2018/11/ZEN-Report-no-7-Bilingual.pdf>. (hentet:18.03.2024).
- [60] Norsk solenergiforening. *Hvorfor solceller?* URL: <https://www.solenergi.no/hvorfor-solenergi>. (hentet: 16.04.2024).
- [61] Norsk solenergiforening. *Solceller*. URL: <https://www.solenergi.no/solstrm>. (hentet: 16.04.2024).
- [62] Tore Steigen. «FotoVoltaiske solceller i Norge: en oversiktsstudie». I: (2018).
- [63] UngEnergi. *Solceller*. 2023. URL: <https://ungenergi.no/energikilder/solenergi/solceller/>. (hentet: 16.04.2024).
- [64] Adrian Nilssen, Rune Strand Sæterøy og Askild Underbakke. «Mulighetsstudie av et solenergisystem ved Innlandet fylkeshus-Optimalisering av et solenergisystem med hensyn på økonomi, effekt og miljø». B.S. thesis. NTNU, 2020.
- [65] H Kang. «Crystalline silicon vs. amorphous silicon: The significance of structural differences in photovoltaic applications». I: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Bd. 726. 1. IOP Publishing, 2021, s. 012001.
- [66] *SUNPOWER 110W solcellepanel m/ monokrystallinske bakkontakt-solceller*. 2024. URL: <https://www.fjordhandel.com/nettbutikk/5-solcellepaneler--lag-din-egen-stroem/19-sunpower-110w-solcellepanel-m-monokrystallinske-bakkontakt-solceller/>. (hentet: 22.04.2024).
- [67] Mathilde Pedersen. *Polykrystallin udgår fra markedet*. 2019. URL: <https://solcellepriser.dk/polykrystallin-udgaar-markedet.html>. (hentet: 22.04.2024).

- [68] *Luminous Flexible Thin Film Solar Pv Panel, 100W, 24V*. 2024. URL: <https://m.indiamart.com/proddetail/thin-film-solar-pv-panel-26264763591.html>. (hentet: 22.04.2024).
- [69] Alaa Abed, Naseer Kasim og Hazim Hussain. «Performance Improvement of CIGS PV Solar Grid Tied System Using Planer Concentrators, Case Study : Baghdad». Ph.d-avh. Jul. 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.33172.73604.
- [70] Turid Worren Reenaas, Erik Stensrud Marstein og Sean Erik Foss. «Solceller». I: *Naturen* 133.6 (2010), s. 280–290.
- [71] Jamie Ryan. *Does Your Home Get Enough Sun For Solar Panels?* 2024. URL: <https://www.solarenergyworld.com/does-your-home-get-enough-sun-for-solar-panels/>. (hentet: 24.04.2024).
- [72] Lena Spitthoff mfl. «Lifetime expectancy of lithium-ion batteries». I: *Micro-Optics and Energy: Sensors for Energy Devices* (2020), s. 157–180.
- [73] F Berglund, J Lam og K Aarrestad. «Lagringsteknologier for fleksibilitet i energisystemet». I: *DNV GL Energy* (2020).
- [74] Hector Beltran, Pablo Ayuso og Emilio Pérez. «Lifetime expectancy of Li-ion batteries used for residential solar storage». I: *Energies* 13.3 (2020), s. 568.
- [75] Alessandro Rosati, Andrea L Facci og Stefano Ubertini. «Techno-economic analysis of battery electricity storage towards self-sufficient buildings». I: *Energy Conversion and Management* 256 (2022), s. 115313.
- [76] Juha Koskela, Antti Rautiainen og Pertti Järventausta. «Using electrical energy storage in residential buildings–Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization». I: *Applied energy* 239 (2019), s. 1175–1189.
- [77] Maik Naumann mfl. «Lithium-ion battery cost analysis in PV-household application». I: *Energy Procedia* 73 (2015), s. 37–47.
- [78] Battery University. *BU-205: Types of Lithium-ion*. 2023. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>. (hentet: 22.04.2024).
- [79] Ghassan Zubi mfl. «The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives». I: *Renewable and sustainable energy reviews* 89 (2018), s. 292–308.
- [80] Mohammadmahdi Ghiji mfl. «A review of lithium-ion battery fire suppression». I: *Energies* 13.19 (2020), s. 5117.
- [81] Jia Liu mfl. «Overview on hybrid solar photovoltaic-electrical energy storage technologies for power supply to buildings». I: *Energy conversion and management* 187 (2019), s. 103–121.

- [82] Daniel-Ioan Stroe mfl. «Accelerated aging of Lithium-ion batteries based on electric vehicle mission profile». I: *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE. 2017, s. 5631–5637.
- [83] Jason Porzio og Corinne D Scown. «Life-cycle assessment considerations for batteries and battery materials». I: *Advanced Energy Materials* 11.33 (2021), s. 2100771.
- [84] *IntelLiGent - Innovative and sustainable high-voltage Li-ion cells for next generation (EV) batteries*. 2023. URL: <https://www.sintef.no/prosjekter/2022/intelligent/>. (hentet: 22.04.2024).
- [85] Birgit Risholt. *Er litiumbatterier brannfarlige?* 2021. URL: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/er-litiumbatterier-brannfarlige/>. (hentet: 16.05.2024).
- [86] Alexander Otto mfl. «Battery management network for fully electrical vehicles featuring smart systems at cell and pack level». I: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2012: Smart Systems for Safe, Sustainable and Networked Vehicles*. Springer. 2012, s. 3–14.
- [87] EVESCO. *ES-10002000S – Containerized Battery Energy Storage System, LiFePO₄ Battery Technology*. 2022. URL: <https://www.power-sonic.com/wp-content/uploads/2022/03/ES-10002000S-1MW-2hr-Battery-Energy-Storage-System.pdf>. (hentet: 01.05.2024).
- [88] Brynjar Arnfinnsson og Even K Tønsberg. «Nullutslippsforsvaret – en mulighetsstudie av klimavennlig teknologi for Forsvaret». I: (2023).
- [89] Statnett. *Raske frekvensreserver - FFR*. 2024. URL: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/ffr/>. (hentet: 03.05.2024).
- [90] *BESS (Battery Energy Storage System)*. URL: <https://solutions.mhi.com/power/decarbonization-technology/bess-battery-energy-storage-system/>. (hentet: 22.04.2024).
- [91] John Clauß mfl. «Practical challenges towards data-driven applications in buildings: lessons-learned from two real-life case studies». I: *2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. 2023, s. 1–6. DOI: 10.23919/SpliTech58164.2023.10193188.
- [92] Forskningsrådet. *Data-drevet intelligent styring av bygninger - DATABYGG*. 2024. URL: <https://prosjektbanken.forskningsradet.no/project/FORISS/317442>. (hentet: 13.05.2024).
- [93] Anne-Lise Aakervik (NTNU) mfl. *INNOVASJONSRAPPORT 2023*. 2023. URL: https://fmezen.no/wp-content/uploads/2024/03/NTNU_ZEN_InnRep_2023_Oppslag.pdf. (hentet: 02.04.2024).

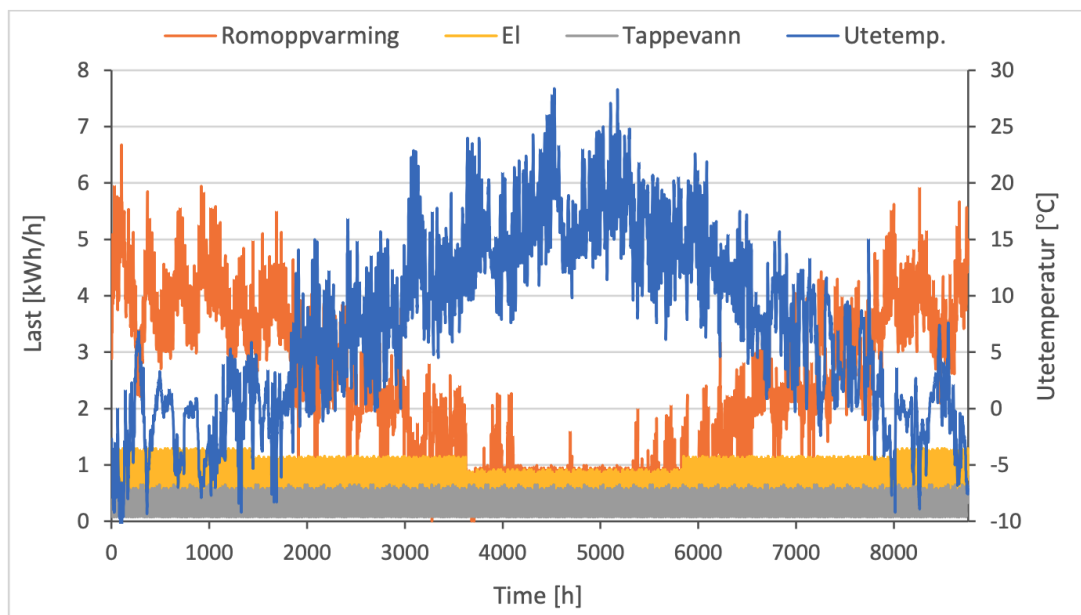
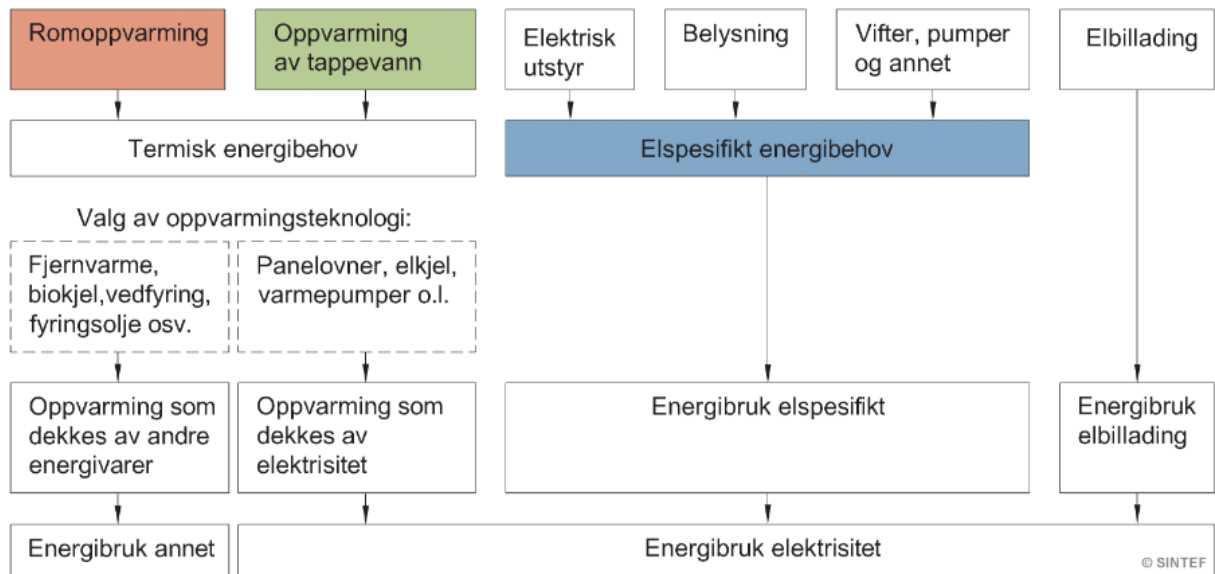
- [94] Georg Mathisen. *Plutselig vil alle ha supervarmepumper*. 2022. URL: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2022/plutselig-vil-alle-ha-supervarmepumper/>. (hentet: 25.04.2024).
- [95] Varmepumpeforeningen. *Hva er COP?* 2023. URL: <https://www.varmepumpeinfo.no/spor-smal-og-svar-om-varmepumper/hva-er-cop>. (hentet: 25.04.2024).
- [96] Even Ruud Fossberget. «Dimensjoneringsprogram for væske/vann-varmepumpe». Masteroppg. OsloMet-Storbyuniversitetet, 2023.
- [97] Varmepumpeforeningen. *Slik virker en varmepumpe*. 2023. URL: <https://www.varmepumpeinfo.no/verdt-a-vite-om-varmepumper/slik-virker-en-varmepumpe>. (hentet: 25.04.2024).
- [98] Enova. *Avtrekksvarmepumpe*. 2016. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/avtrekksvarmepumpe-/>. (hentet: 29.04.2024).
- [99] Enova. *Luft-til-luft-varmepumpe*. 2016. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/luft-til-luft-varmepumpe/>. (hentet: 29.04.2024).
- [100] Enova. *Luft-til-vann-varmepumpe*. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/luft-til-vann-varmepumpe/>. (hentet: 29.04.2024).
- [101] Enova. *Væske-til-vann-varmepumpe*. 2016. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/vaske-til-vann-varmepumpe-/>. (hentet: 29.04.2024).
- [102] Ragnhild Kjæstad Sæterli. *Termisk energilagring*. 2023. URL: <https://www.sintef.no/fagomrader/energieffektivisering-i-industrien/termisk-energilagring/>. (hentet: 15.05.2024).
- [103] Enova. *Akkumulatortank*. 2023. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/akkumulatortank/>. (hentet: 01.05.2024).
- [104] Norsk fjernvarme. *Fjernvarme*. 2023. URL: <https://www.fjernvarme.no/fakta/fjernvarme>. (hentet: 01.05.2024).
- [105] Henrik van Dam, Magnus Pareli Nilsen og Kristoffer Ballantine Øverby. «Kartlegging og varmetapsberegninger av et fjernvarmenett». B.S. thesis. NTNU, 2021.
- [106] Norsk Fjernvarme. *Fjernkjøling*. 2023. URL: <https://www.fjernvarme.no/fakta/fjernkjoling>. (hentet: 01.05.2024).
- [107] Statkraft Varme. *Fjernvarme i Trondheim*. 2023. URL: <https://www.statkraftvarme.no/om-statkraftvarme/fjernvarmeanlegg/trondheim/>. (hentet: 01.05.2024).
- [108] Aleksander Heen. «Sesonglagring av solvarme til bygningsoppvarming: et case-studie». Masteroppg. Norwegian University of Life Sciences, Ås, 2018.
- [109] Asplan Viak. *Solenergi + sesongvarmelagring i borehull = sant!* 2021. URL: <https://www.asplanviak.no/prosjekter/konseptutredning-solenergi-sesongvarmelagring-i-borehull-sant/>. (hentet: 03.05.2024).

- [110] Alexis Sevault. *Hva er faseendringsmaterialer (PCM) og vil det slå ann i Norge?* 2018. URL: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/energieffektivisering-cat/pcm-faseendringsmaterialer/>. (hentet: 30.04.2024).
- [111] Christina Benjaminsen. *Dette biobatteriet gjør det mulig å lagre energi fra sol og vind.* 2022. URL: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2022/dette-biobatteriet-gjor-det-mulig-a-lagre-energi-fra-sol-og-vind/>. (hentet: 30.04.2024).
- [112] IEA. *ETP Clean Energy Technology Guide.* 2023. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>. (hentet: 15.05.2024).
- [113] Erik Stensrud Marstein mfl. *Veikart for den norske solkraftbransjen mot 2030.* 2020. URL: https://www.regjeringen.no/contentassets/66de7ddcf7a6494694202b760fa3f50f/susoltech_.pdf. (hentet: 15.05.2024).
- [114] Ingunn Mjønerud. *Er solenergi miljøvennlig?* 2023. URL: <https://solceller.no/er-solenergi-milj%C3%B8vennlig>. (hentet: 15.05.2024).
- [115] Nærings- og fiskeridepartementet. *Norge og USA enige om å inngå strategisk mineralsamarbeid.* 2024. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-og-usa-enige-om-a-innga-strategisk-mineralsamarbeid/id3035236/>. (hentet: 15.05.2024).
- [116] Nærings- og fiskeridepartementet. *Norge inngår grønt strategisk industripartnerskap med EU.* 2024. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-inngar-gront-strategisk-industripartnerskap-med-eu/id3031333/>. (hentet: 15.05.2024).
- [117] Directorate-General for Environment. «Circular economy: New law on more sustainable, circular and safe batteries enters into force». I: (2023).
- [118] EØS-notat. *Batteriforordningen.* 2023. URL: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2021/jan/batteriforordningen/id2828700/>. (hentet: 15.05.2024).
- [119] Hege Rooth Olbergsveen. *EU vedtar omfattende regelverk for batterier.* 2023. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/nyheter/2023/juni-2023/eu-vedtar-omfattende-regelverk-for-batterier/>. (hentet: 15.05.2024).
- [120] Nærings- og fiskeridepartementet. *Veikart 2.0: Grønt industriløft.* 2023. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/veikart-2.0-gront-industriloft/id2996119/>. (hentet: 15.05.2024).
- [121] Trondheim kommune. «NYHAVNA SOM NULLUTSLIPPSOMRÅDE, Sluttrapport». I: (2021).

- [122] Team COBE m/Topic Architecture, MOE og Olav Olsen. *Ny Havn - Nye horisonter*. URL: https://nyhavna.no/wp-content/uploads/2022/12/Team_Cobe_Nyhavna_Plancher_red1.pdf. (hentet: 19.03.2024).
- [123] ZEN Research Centre. *Pilotprosjekt*. 2023. URL: <https://fmezen.no/category/pilotprosjekter/>. (hentet: 16.05.2024).
- [124] Statsbygg og NTNU. «Miljøprogram NTNU Campus». I: (2021).
- [125] ZEN Research Centre. *Pilotprosjekt: Ydalir Elverum*. 2023. URL: <https://fmezen.no/ydalir-elverum/>. (hentet: 15.05.2024).
- [126] Magnus Askeland Lars Arne Bø Eivind Junker. «ZEN OG LOVVERKET - Muligheter og begrensninger i dagens lovverk ved utvikling av et ZEN område». I: *ZEN MEMO No.26* (2020).
- [127] Meteorologisk institutt. *Observasjoner og værstatistikk*. 2024. URL: <https://seklima.meteor.no/>. (hentet: 13.05.2024).
- [128] PVGIS. 2022. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
- [129] EU Science Hub. *PVGIS user manual*. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en#ref-3-choosing-solar-radiation-database.
- [130] Electric Vehicle Energy Storage Company. *ES-10002000S*. 2022. URL: <https://www.power-sonic.com/wp-content/uploads/2022/03/ES-10002000S-1MW-2hr-Battery-Energy-Storage-System.pdf>. (hentet: 22.04.2024).

A Modelleringsverktøyet PROFet

[14, 32]



B ZEN kategorier, vurderingskriterier og KPI





Utfyllende tabell over ZEN kategorier, vurderingskriterier og nøkkelindikatorer [57]



























































































































































Kategori	Vurderingskriterier	Nøkkelindikatorer (KPI)	Omfang	KPI-poeng	Strategisk planleggingsfase	Implementeringsfase	Driftsfase
KGU	Utslippsreduksjon	<i>KGU1.1 Materialer (A1-A3, B4)</i>	BN	11	X	X	X
		<i>KGU1.2 Byggefase (A4-A5)</i>	BN	2	X	X	X
		<i>KGU1.3 Bruk (B1-B3, B5)</i>	BN	1	X	X	X
		<i>KGU1.4 Energibruk i drift (B6)</i>	BN	12	X	X	X
		<i>KGU1.5 Transport i drift (B8)</i>	N	19	X	X	X
		<i>KGU1.6 Sluttfase (C1-C4)</i>	BN	1	X	X	X
	Kompensasjon	<i>KGU1.7 Fordeler og konsekvenser (D)</i>	BN	4	X	X	X
ENE	Energieffektivitet i bygninger	<i>ENE2.1 Energibehov i bygg</i>	B	8	X	X	
	Energibærer	<i>ENE2.2 Levert energi</i>	N	8	X	X	X
		<i>ENE2.3 Egenforbruk</i>	N	2	X	X	X
		<i>ENE2.4 Netto lastprofiler</i>	N	1	X	X	X
		<i>ENE2.5 Fargekodete teppeplott</i>	N	1	X	X	X
EFF	Effektytelse	<i>EFF3.1 Maksimal last</i>	N	6	X	X	X
		<i>EFF3.2 Maksimal eksport</i>	N	2	X	X	X
		<i>EFF3.3 Energibelastning</i>	N	6	X	X	X
		<i>EFF3.4 Representative dager</i>	N	2	X	X	X
	Lastfleksibilitet	<i>EFF3.5 Endring i levert energi</i>	N	1	X	X	X
		<i>EFF3.6 Endring i driftskostnader</i>	N	1	X	X	X
		<i>EFF3.7 Endring i Energibelastning</i>	N	1	X	X	X
		<i>EFF3.8 Endring i maksimal last</i>	N	1	X	X	X
BYF	Tetthet og arealbruksmiks	<i>URB4.1 Befolkningstetthet</i>	N	2	X		
		<i>URB4.2 Blokketetthet</i>	N	1	X		

Kategori	Vurderingskriterier	Nøkkelindikatorer (KPI)	Omfang	KPI-poeng	Strategisk planleggingsfase	Implementeringsfase	Driftsfase	
ØKO	Bygningslayout	<i>URB4.3 Arealbruksmiks</i>	N	2	X			
		<i>URB4.4 Tilgang til mangfold av fasiliteter</i>	N	2	X			
		<i>URB4.5 Boligtype</i>	B	1	X			
		<i>URB4.6 Flerbruks bygningstak</i>	B	1	X			
		<i>URB4.7 Aktive fasader</i>	B	2	X			
		Gatenettverk	<i>URB4.8 Gatetilkoblinger</i>	N	2	X		
			<i>URB4.9 Gatekryss tetthet</i>	N	1	X		
			<i>URB4.10 Sykle- og gangbare gater</i>	N	1	X		
		Grønn åpen rom	<i>URB4.11 Andel grønn åpen rom</i>	N	2	X		
			<i>URB4.12 Andel grønt permeable areal</i>	N	2	X		
			<i>URB4.13 Konservering og planting av trær</i>	N	1	X		
		MOB	Tilgang	<i>MOB5.1 Tilgang til kollektivtransport</i>	N	3		X
	<i>MOB5.2 Reisetidsforhold</i>			N	3	X	X	X
<i>MOB5.3 Parkeringstilbud</i>	BN			3	X	X	X	
<i>MOB5.4 Bilhold</i>	BN			3	X	X	X	
Reisevaner	<i>MOB5.5 Mobilitetsmønster</i>		N	3	X	X	X	
	<i>MOB5.6 Transportarbeid</i>		N	3	X	X	X	
Logistikk	<i>MOB5.7 Vare- og nyttetransport</i>		N	2	X	X	X	
ØKO	Livsløpskostnader (LCC)	<i>ØKO6.1 Kapitalkostnader</i>	BN	6	X	X		
		<i>ØKO6.2 Driftskostnader</i>	BN	6	X	X	X	
	Kost nytte	<i>ØKO6.3 Overordnet ytelse</i>	BN	8	X	X	X	

C Lagringsteknologier med kategorisert egnethet

Ni ulike lagringsteknologier med gradert egnethet i forhold til bruksområde. Tabellen er direkte utklipp fra DNV rapport *Lagringsteknologier for fleksibilitet i energisystemet* fra 2020 [73].

	Uegnet	Teknologien har ikke de riktige egenskapene som skal til for å levere en tjeneste.
	Noe egnet	Teknologien har til en viss grad de riktige egenskapene som skal til for å levere en tjeneste.
	Egnet	Teknologien har de riktige egenskapene som skal til for å levere en tjeneste, men er ikke eller i liten grad brukt til å levere denne tjenesten i dag.
	Velegnet	Teknologien har de riktige egenskapene som skal til for å levere en tjeneste, og brukes til å levere denne tjenesten i dag.

		Pumpekraft	Lagring av trykkluft	Lagring av flytende luft	Svinghjul	Li-ion-batteri	Flytbatteri	Hydrogen	Termisk lagring	Fleksibel last
Kraftprodusenter	Flytting av produksjon									
	Redusere pålagt struping									
	Møte produksjonsprognoser									
	Black start									
TSO	Frekvensregulering									
	Flaskehals									
	Beredskap									
DSO	Spenningskvalitet									
	Flaskehals									
	Optimal lastflyt									
	Beredskap									
Sluttbrukere	Redusere effekttopper									
	Arbitrasje									
	Økt egenkonsum									
	Nødstrøm/ UPS									
	Mikronett/ øydrift									
Engros-marked	Arbitrasje									
Annet	Sesonglagring									

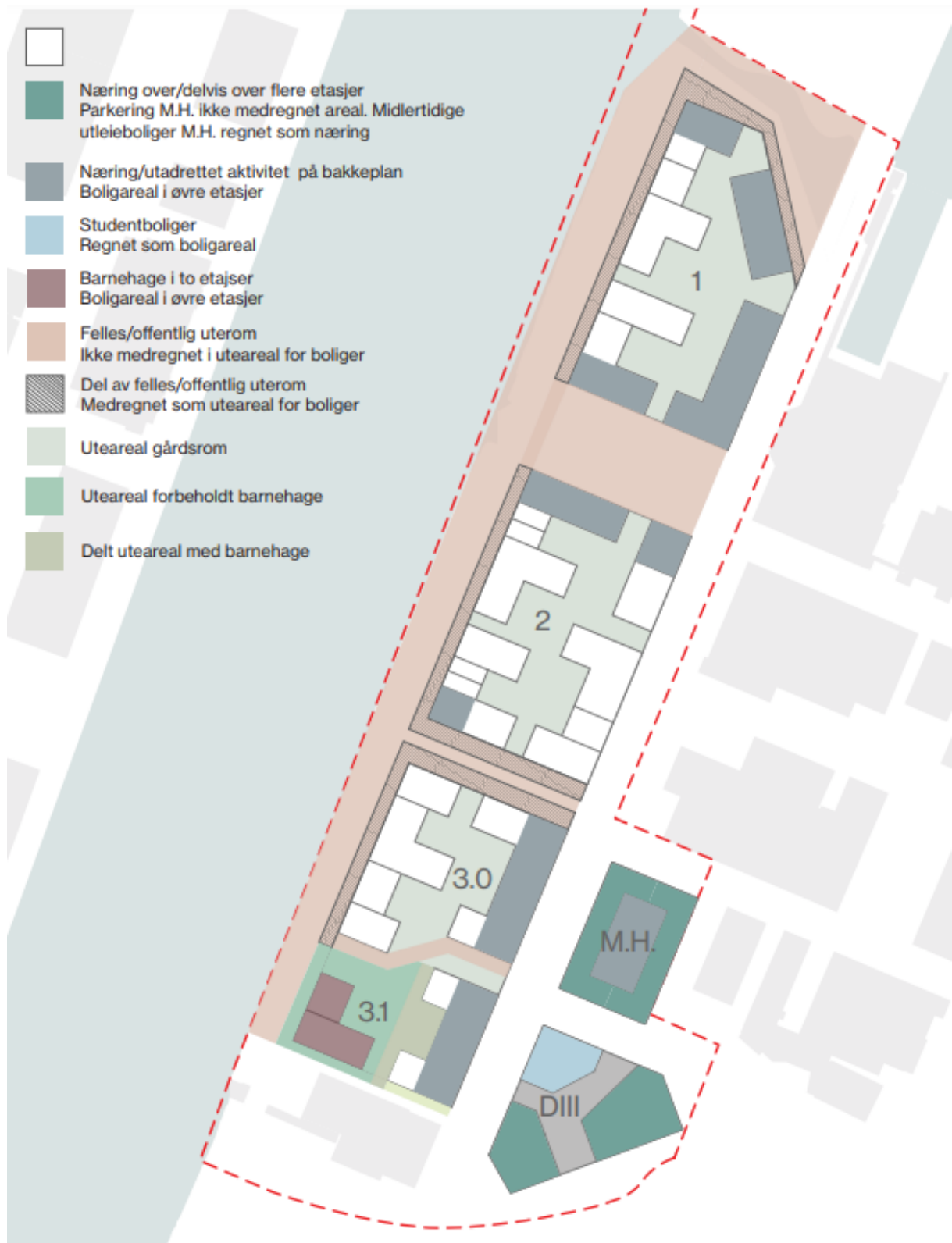
D Batterispesifikasjoner for valgt batteripakke

Tabell D.1: Batteri spesifikasjoner. Hentet fra: [130]

	Per batterisystem	Total BESS (parallellkobling)
Nominell energi	2 064 kWh	12 384 kWh
Effekt (AC)	1 000 kW	6 170 kW
Nominell kapasitet	1 680 Ah	10 080 Ah
Nominell DC spenning	1 228.8 V	
DC spenningområde	1 075,2 - 1 363.2 V	
Maks lading	836,8 A	5 020,8 A
Maks utladning	836,8 A	5 020,8 A
Nettkoblet AC-tilkobling	690 VAC 50 / 60 Hz	
Cellessykluser @ 25 °C	5 000	
Transformasjon til last	690 V: 400, 230 V osv.	
Transformasjon til grid	0,690 kV: 20, 25, 35 kV osv.	
Driftstemperatur (oppladning)	0 °C til 45 °C	
Driftstemperatur (utladning)	-20 °C til 55 °C	
Cellekjemi	Litium-Jern-Fosfat ($LiFePO_4$)	
Dimensjoner	6058 x 2438 x 2591 mm	6058 x 2438 x 2591 mm x 6
Vekt	24 000 kg	144 000 kg

E Områdeoversikt over Transittkaia

Områdeoversikt over Transittkaia utgitt av *team Cobe* [122].



F State of Charge for det simulerte året

