

Marita Rendedal
Nadia Supinska
Jannike S. Økland

Energiforsyning med fokus på ZEB i Trondheim Katedralskole

Bacheloroppgave i Ingeniørfag, fornybar energi
Veileder: Jacob J. Lamb
Medveileder: Laurina C. Felius
Mai 2023

Marita Rendedal
Nadia Supinska
Jannike S. Økland

Energiforsyning med fokus på ZEB i Trondheim Katedralskole

Bacheloroppgave i Ingeniørfag, fornybar energi
Veileder: Jacob J. Lamb
Medveileder: Laurina C. Felius
Mai 2023

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



Kunnskap for en bedre verden



Institutt for energi-
og prosessteknikk

Bacheloroppgave

Oppgavens tittel: Energiforsyning med fokus på ZEB i Trondheim Katedralskole Project title (ENG): Energy supply with focus on ZEB in Trondheim Katedralskole	Gitt dato: 21.11.2022
	Innleveringsdato: 22.05.2023
	Antall sider rapport / sider vedlagt: 101/45
Gruppedeltakere: Marita Rendedal Nadia Supinska Jannike S. Økland	Veileder: Jacob Lamb Førsteamanuensis, NTNU jacob.i.lamb@ntnu.no
	Prosjektnummer: BIFOREN23-03
Oppdragsgiver: Rambøll i Trondheim	Kontaktperson hos oppdragsgiver: Laurina Felius Rådgiver Bygningsfysikk laurina.felius@ramboll.no

Fritt tilgjengelig:

Tilgjengelig etter avtale med oppdragsgiver:

Rapporten frigitt etter:

Gruppedeltakere signaturer:

Nadia Supinska Jannike S. Økland

Marita Rendedal

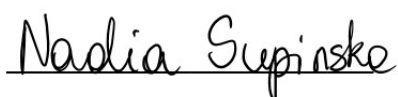
Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet i forbindelse med en grad innen studieprogrammet Bachelor i ingeniørfag, fornybar energi ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven er skrevet i samarbeid mellom 3 NTNU studenter; Marita Rendedal, Nadia Supinska og Jannike S. Økland og bedriften Rambøll i Trondheim, våren 2023. All nødvendig data i denne oppgaven er gitt av Rambøll, og det takkes for tilliten og ressursene. Dette prosjektet omhandler prosjektering av energiforsyning til Trondheim Katedralskole med fokus på ZEB. Gruppen har ved denne anledning lært mye om solceller, energilagring og nullutslippsbygg.

Gruppen vil gi en stor takk til Torger Mjønes, fagsjef og gruppeleder for bærekraftige bygg i Trøndelag fylkeskommune, for en utfyllende samtale knyttet til prosjekter som ligner dette. Ikke minst vil det takkes Jonas Buan og Anders Sørgård fra HENT AS, som har gitt gruppen utfyllende informasjon om Tiller vgs prosjektet og solcelleprosjektering generelt. Stor takk til Evyons, EcoStors, Brytes og Solcellespesialistens forslag og innspill til dette prosjektet. Det rettes også en takk til Gabriele Loboccaro, førsteamanuensis på NTNU, for innblikk i solcelleprosjekter og Håkon Kjensli, bærekraftsrådgiver i Betonmast, for prosjektets statusoppdatering. Disse bidragene har vært til stor nytte for oppgaven.

Til slutt vil gruppen takke de to viktigste bidragsyttere i denne oppgaven, nemlig interne veileder Jacob J. Lamb og eksterne veileder Laurina C. Felius for god oppfølging, hjelp og gode råd underveis i oppgaven. Gruppen setter pris på all tid og ressurser dere har bidratt med.

Trondheim 22. mai 2023



Nadia Supinska



Marita Rendedal



Jannike S. Økland

Sammendrag

Trondheim Katedralskole er en av de eldste skolene i Norge. Skolen består per i dag av 5 bygg. Det planlegges en større renovasjon av skolen, noe som innebærer bygging av 2 nybygg. Målet med renovasjonen, og dermed også dette prosjektet, er at nybyggene skal oppnå status som nullutslippsbygg i driftsfasen, altså ZEB-O. For å få til dette må nybyggene ha en fornybar energiproduksjon på minst 105600 kWh /år. Hensikten med denne oppgaven er dermed å prosjektere et solcelleanlegg på hver av nybyggene som oppnår denne produksjonen. Solcelleanlegget skal, i følge prosjektspesifikke miljøoppfølgingsplanen, planlegges i kombinasjon med energilagring.

For å oppnå ZEB-O kravene ble det tatt utgangspunkt i solcellepaneler med EPD. Disse panelene ble sammenlignet og nøye analysert, og det er blitt valgt å jobbe videre med solcellepaneler av typen Maxeon 3 og Series 6. Solcelleanlegget ble prosjektert på taket til begge nybyggene, i tillegg til at det ble vurdert løsninger på fasadene til et av byggene. I forbindelse med dette ble det beregnet et brukbart areal på begge takene og fasadene. Dette ble så utgangspunktet for simuleringene i programmet PVSyst. Det er blitt gjort beregninger med og uten batterier, og for å nå kravene i oppgaven ble det videre satset på løsninger med batterier.

Det er blitt tatt utgangspunkt i 3 ulike energilagringsteknologier, nemlig nye litiumionebatterier, gjenbrukte litiumionebatterier og redoks vanadium flytbatterier. Disse er blitt sammenlignet med utgangspunkt i leverandørsikkerhet, sikkerhet, batteriytelse, størrelse og miljø. I følge MOP skal batteriene ha en minimumeffekt på 75 kW med en batterikapasitet på 350 kWh , og kunne dekke minimum 30 % av effektbehovet i driftstime med høyeste effektlast. Batterianlegget i dette prosjektet skal plasseres i et allerede eksisterende rom i kjelleren til et av de gamle byggene. Dette setter begrensninger for det endelige valget av batterianlegget.

Utifra simuleringene i PVSyst ble det valgt 4 endelige scenarioer for prosjektering av solceller som oppfylte ZEB-O og MOP-kravene. Hovedforskjellen mellom de ulike scenarioene var det totale brukbare arealet på taket, panelmodulene og om anlegget skulle være med eller uten fasadeløsninger. Det ble så diskutert hvorvidt det historiske inntrykket eller miljø og den totale fornybare produksjonen som skal prioriteres. Resultatene ble ulike for alle løsninger og det ble diskutert om overproduksjon er gunstig for det endelige valget i prosjektet. Videre ble de ulike alternativene for energilagring vurdert. Flytbatterianlegget ble for stort for det gitte batterirommet. Av den grunn ble det endelige valget mellom nye og gjenbrukte litiumionebatterier. Det som skilte disse er batteriytelsen og miljøaspektet.

Det ble konkludert med scenario 3 altså Maxeon 3 solcellepaneler på tak og fasade og 3 m avstand fra takkanten. Bakgrunnen for dette er at dette scenarioet har det laveste utslippet i løpet av hele livsløpsfasen, samt lavest overskuddsproduksjon. For batteriløsningen ble det valgt gjenbrukte litiumionebatterier, ettersom miljøaspektet anses som en viktigere faktor enn batteriytelsen, i denne oppgaven. Batteriene ble likevel ikke sett på som en nødvendighet for å oppnå ZEB-O kravene og det kan vurderes å ikke benytte de i det endelige prosjektet.

Abstract

Trondheim Katedralskole is one of Norway's oldest schools. The school consists of 5 buildings. It is planned a bigger renovation of Trondheim Katedralskole that includes 2 new buildings. The goal of the renovation and also this project is for the new buildings to achieve zero emission under operation, also called ZEB-O. The new buildings must have a renewable energy production of at least 105600 $kWh/year$ to achieve this. The purpose of this thesis is to design a solar cell system on each of the new buildings to achieve this energy production. The solar cell system will according to the project specific requirements (MOP) be planned in combination with energy storage.

To achieve ZEB-O requirements it was only considered solar panels that have an EPD. These was compared and analyzed, and the chosen solar panels was Maxeon 3 and Series 6. The solar system was placed on the roof on both of the new buildings and considered to be placed on the facades on one of the new buildings. Therefor it was calculated a usefull area on the roofs and the facades. These areas was used in the simulations in PVSyst. It was done calculations with and without batteries, and to achieve the requirements in this thesis it was only focused on the solutions with batteries.

3 different energy storage technologies have been considered. These are new lithium-ion batteries, reused lithium-ion batteries, and redox vanadium flow batteries. These technologies have been compared based on supplier reliability, security, battery performance, size, and environment. According to the MOP the batteries must have a minimum efficiency of 75 kW and a battery capacity of 350 kWh and be able to cover a minimum of 30 % of the power demand in the operating hours with the highest power load. The battery system in this project will be placed in a pre-existing room in the basement of one of the old buildings. This limits the final choice of the battery system.

Based on the simulations in PVsyst, 4 final scenarios were chosen for the design of the solar system that met the ZEB-O and MOP requirements. The main differences between these scenarios were the total usable area on the roof, the panel modules and whether the solar plant should be with or without facade solutions. Further, it was discussed whether the historical impression or the environment and the total renewable production should be prioritized. The results were unique for all the different solutions, and it was discussed whether overproduction is beneficial for the final choice in the project. Furthermore, the various options for energy storage were assessed. The flow battery system was too large for the given battery room. For that reason, the focus was placed on the new and reused lithium-ion batteries for the final choice. What differentiates these is the battery performance and the environmental aspect.

It was concluded with scenario 3 with the Maxeon 3 solar panels on the roof and facades and with 3 m distance from the roof edges. The reason for this is that the scanario has the least amount of emissions during the entire life cycle, as well as the lowest overproduction. Reused lithium ion batteries was chosen for the battery solution since the environmental aspect was considered as more important than the battery performance. The batteries were not necessary to achieve ZEB-O requirements and may be considered to not be installed in the final project.

Symbolliste

Symbol	Forklaring	Enhet*
A_{fl}	Oppvarmet del av BRA	m^2
DUT_s	Dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold	$^{\circ} C$
$EP_{H,0}$	Basis netto spesifikt oppvarmingsbehov	$kWh/(m^2 \cdot \text{år})$
K_1	Klimakoeffisient for oppvarmingsbehov	
K_2	Klimakoeffisient for oppvarmingsbehov	
n_{50}	Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell	h^{-1}
U-verdi	Varmegjennomgangskoeffisient	W/m^2K
X	Arealkoeffisient for oppvarmingsbehov	$kWh/(m^2 \cdot \text{år})$
β	Kjølebehovskoeffisient	
θ_{ym}	Årsmiddeltemperatur	$^{\circ} C$

* Tom celle betyr ingen enhet

Akronymer

Akronym	Definisjon
AC	Vekselstrøm
AMS	Avanserte målings- og styringssystemer
BAPV	Building-Applied Photovoltaics (Bygningsanvendte solceller)
BESS	Batterienergilagringssystem
BIPV	Building-Integrated Photovoltaics (Bygningsintegreerte solceller)
BMS	Batteristyringssystemer
BPIE	The Buildings Performance Institute Europe
BRA	Bruksareal
COP	Effektfaktor/Varmefaktor
DC	Likestrøm
DoD	Depth of Discharge
EMS	Energistyringssystemer
EPC	Energy Performance Contracting
EPD	Environmental Product Declaration
eq	ekvivalenter
EU	Den europeiske union
GWP	Global Warming Potential
HAN	Home Area Network
ISO	International Organization for Standardization
kW _p	kilo Watt peak/Nominiell effekt
MOP	Miljøoppfølgingsplan
NS	Norsk Standard
NTNU	Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet
PCM	Phase Changing Material
PCS	Strømkonverteringssystem
PV	Photo Voltaics
RIE	Rådgivende Ingeniør Elektro
RIV	Rådgivende Ingeniør VVS
RKOM	Regulerkraftopsjonsmarkedet
SCOP	Årsvarmefaktor
SD-anlegg	Sentalt driftsanlegg
SFP	Specific Fan Power
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
STC	Standard Test Conditions
TRFK	Trondheim Fylkeskommune
VVS	Varme-, Ventilasjons- og Sanitærteknikk
ZEB	Zero Emission Building (Nullutslippsbygg)
ZEN	Zero Emission Neighbourhoods (Nullutslippsnabolag)

Begrepsliste

Begrep	Forklaring
C-rate	Ladning- og/eller utladningsraten som er lik batterikapasiteten delt med en time [1].
Depth of Discharge	"Mengden av energi som har blitt tappet fra et batteri" [1].
Diffusjonshastighet	Hastigheten ved hvilken et stoff, lyd eller lys sprer seg til et annet materiale [2].
Effektutjevning	Kutting av effektopper (høy uttak/inntak av effekt over en kort periode) i strømmettet for å oppnå et jevnere forbruk [3].
Elektronmobilitet	Mobilitet som forteller om hvor raskt et elektron kan bevege seg gjennom et fast materiale når det blir trukket av et elektrisk felt [4].
Fotovoltaisk effekt	En effekt som genererer elektrisk spenning og dermed også strøm i et stoff som ble utsatt for lys [5].
Grønn områdeutvikling	Et system hvor en anser flere bygninger som en del av det hele og utvikler et område med felles mål for energieffektivisering og fornybar energiforsyning [6].
Hybrid	Et off-grid system som kan koble seg on-grid [7].
Krystallstruktur	Struktur som forteller hvordan atomene er satt sammen i et systematisk ordnet (krystallinsk) fast stoff [8].
Likestrøm	En elektrisk strøm som flyter i en retning med samme styrke [9].
Monokrystallinsk	Et materiale bestående av en enkelt krystall [10].
Multikrystallinsk	Et materiale bestående av flere krystaller [10].
N-doping	En betegnelse for tilsetning av et fremmedstoff med et overskudd av elektroner [11].
Off-grid	Et selvstendig system som ikke er koblet til nettet [7].
Oktettregelen	En regel som sier at atomet ønsker å ha åtte elektroner i det ytterskallet [12].
On-grid	Et system som er koblet til nettet [7].
Parallellkobling	En gruppe celler som kobles ved å forbinde den positive terminalen på en celle til den negative terminalen på den neste [1].
P-doping	En betegnelse for tilsetning av et fremmedstoff med et underskudd av elektroner [11].
Round-trip efficiency	Forholdet mellom energien som ble tilført til et batteri og mengde energi som kan hentes ut fra batteriet etter hele ut- og oppladningssyklusen [13].
Seriekobling	En gruppe celler hvor alle positive og negative terminaler er koplet sammen hver for seg [1].
Sirkulær økonomi	Et økonomisk system hvor produkter skal vare og ressurser skal brukes om igjen i nye anvendelser [14].
Sluttspenning	Spenningen når batteriet er utladet [1].
State of Charge	Forholdet mellom gjenværende ladning i batteriet og den maksimale ladningen som kan leveres av batteriet [15].
State of Health	Forholdet mellom den maksimale kapasiteten til et batteri på tidspunktet det studeres og den maksimale kapasiteten til batteriet da det var nytt [15].
Substrat	Et stoff som endres i en kjemisk reaksjon [16].
Synergi	Et samspill mellom flere faktorer hvor den kombinerte effekten blir større enn de enkelte faktorenes bidrag summert [17].
Thermal runaway	Fenomen som oppstår når det forekommer ukontrollerbare eksoterme reaksjoner i et batteri, som fører til en vedvarende temperaturøkning [18].
Tynnfilm	Et materiale med en tykkelse på noen få mikrometer, som er deponert på et substrat [19].
Vekselstrøm	En elektrisk strøm som skifter retning periodisk. I gjennomsnitt går like mye strøm i begge retninger [9].

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Symbolliste	iv
Akronymer	v
Begrepsliste	vi
Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Innledning	1
2 Energieffektive bygninger	2
2.1 Bygningens klimaskall	2
2.2 Byggeteknisk forskrift TEK17	3
2.3 Passivhus	4
2.4 Nullutslippsbygg - ZEB	5
2.5 Klimamål og lovgivning	6
3 Trondheim Katedralskole	8
3.1 Om prosjektet	8
3.1.1 Prosjektet	9
3.1.2 Miljøoppfølgingsplan - MOP	10
3.1.3 Plusskundeordning	11
3.2 Energisystemet	12
3.3 Klima i Trondheim	14
3.4 Lignende prosjekter	15
4 Solceller	18

4.1	Solenergi	18
4.2	Solcelleteknologi	19
4.3	Prosjektering av solcelleanlegg på bygg	19
4.4	Miljøperspektiv og solcellemoduler	21
4.5	Tilkobling til bygg og strømnnett	22
5	Energilagring	25
5.1	Elektrisk energilagring	25
5.1.1	Bruksområde og formål	25
5.1.2	Sentrale parameter	26
5.1.3	Forskjellige batterityper	27
5.2	Termisk energilagring	29
5.3	Bærekraft og miljø	30
5.4	Sikkerhet	31
5.5	Styringssystemer	31
5.6	Batterisystemer i Trondheim Katedralskole	31
5.6.1	Dimensjonering	32
5.6.2	Energiutveksling	32
6	Mål med prosjektet	33
7	Metode	34
7.1	Fremgangsmåte	34
7.2	PVSyst	34
7.2.1	Månedlige produksjonsberegninger	35
7.3	Solcelleberegninger	36
7.4	Valg av alternativer	36
8	Alternativsvurderinger	37
8.1	Solcelleprosjektering	37
8.1.1	Solcellevalg	37
8.1.2	Beregninger med solceller	38
8.1.3	Dimensjoner for prosjektering	39

8.2	Energilagringsmuligheter	46
8.2.1	Sammenligning av teknologier	53
8.3	Strategier for energilagring	57
8.4	Andre forslag til prosjektet	58
8.4.1	Fjernvarme vs varmepumpe	59
8.4.2	Alternative fasadeløsninger	60
8.4.3	Termisk energilagring	62
9	Resultater	64
9.1	Energiproduksjon	64
9.1.1	Månedsverdier	64
9.1.2	Produksjon	65
9.1.3	Scenarier	67
9.1.4	Fasade	67
9.1.5	Tapdiagram	68
9.1.6	Daglig produksjon gjennom året	69
9.1.7	Tilgjengelig energi	70
9.1.8	Energiforbruk vs energiproduksjon	71
9.2	Miljø	72
9.3	Elektrisk energilagring	73
10	Diskusjon	75
10.1	Scenariene	75
10.2	Usikkerheter i prosjektet	76
10.3	Elektrisk energilagring	76
10.4	Energilagringsstrategier og energiutveksling	77
11	Konklusjon	78
	Referanser	79
A	Møtereferat Torger Mjønes	I
B	Møtereferat Jonas Buan	V

C Møtereferat Anders Sørgård	VI
D Møtereferat Ellen Loxley	VIII
E Møtereferat Gabriele Lobaccaro	XI
F Møtereferat Dag L. Henriksen	XIII
G Beregninger i MATLAB av COP for Annex 03-H/C	XVI
H Resultat fra beregninger i PVSyst	XVII
I Opphavsrettsnotis Standard Norge	XXV
J Forprosjektet	XXVI
K Poster	XLV

Figurer

2.1	Oversikt over ZEB ambisjonsnivåer beskrevet i tabell 2.6 satt i sammenheng med livsløpsfaser. A1-B6 beskriver livsløpsstadier. Bildet er hentet fra ZEB Project report 29 - 2016 [40].	6
3.1	Planområdet av Trondheim Katedralskole fra 1957 (venstre) og 2022 (høyre). Bildet er hentet fra Bygningsfysisk konseptrapport fra Rambøll [53]	8
3.2	3D tegning av de nybyggene (grønn ramme) kombinert med eksisterende bygg (rød og grå ramme). Bildet er hentet fra en fil fra Rambøll, fra 3D programmet Solibri	9
3.3	Energisystemet til Trondheim Katedralskole	12
3.4	Energikilder i Statkraft Varme 2021. Bildet er hentet fra Statkrafts nettside [61]	13
3.5	Temperaturgraf for Trondheim for perioden mars 2022 - mars 2023. Bildet er hentet fra yr.no [66]	14
3.6	Nedbørgraf for Trondheim for perioden mars 2022 - mars 2023. Bildet er hentet fra yr.no [66]	15
3.7	Nye Heimdal vgs har oppnådd nivået ZEB-O. Bildet er hentet fra saupstad.no [68]	15
3.8	Nye Horten vgs har oppnådd BREEAM-NOR sertifisering ”Outstanding”. Bildet er hente fra LINK arkitektur [72]	16
3.9	Ishavsbyen vgs er i detaljert design fase. Skolen skal oppnå nZEB-krav. Bildet er hentet fra Troms og Finnmark fylkeskommune/Peab Bjørn Bygg [73]	17
4.1	Vinkler for Trondheim Katedralskole hentet fra PVSyst	18
4.2	Systemgrenser i EPD Norge. Bildet er hentet fra EPD-en til N-Peak 2 [85]	21
4.3	Solcellemodulene som har EPD. Bildet er satt sammen av bilder fra kildene i modullisten ovenfor	22
4.4	Dioder tilkoblet solcellepaneler. Bildet er hentet fra electronics-tutorials.ws [92]	23
5.1	Figuren viser at batteriet lades når forbruket er lavt og kutter effekttopper når forbruket er høyt. Bildet er hentet fra AE-solar [103]	26
5.2	Figuren vise litiumionebatteriets oppbygning og er hentet fra UL Research Institutes [109]	27
5.3	Figuren viser LFP-batteriets oppbygning og er hentet fra Sinovoltaics [112]	28
5.4	Figuren viser flytbatteriets oppbygning og er hentet fra Green Car Congress [116]	29
5.5	Figuren viser til venstre; PCM-varmelager i ZEB-labaratoriet og til høyre; Puteplater i varmelageret uten PCM. Bildene er hentet fra Sintef [105]	30
7.1	Bilde fra programmet PVSyst	34
7.2	Eksempel på et prosjekteringsalternativ med valg av areal, solcellepanel, inverter og mer. Figuren er hentet fra PVSyst	35

8.1	Prosjektering av Series 6 solceller på taket med 3 m avstand fra kanten. Bildet er laget i Photoshop	41
8.2	Prosjektering av Maxeon 3 solceller på taket med 1 m avstand fra kanten. Bildet er laget i Photoshop	41
8.3	Den øverste delen av den sørliggende fasaden. Bildet er laget i Photoshop	42
8.4	Den nederste delen av den sørliggende fasaden. Bildet er laget i Photoshop	42
8.5	Solceller på den sørliggende fasaden med Series 6. Bildet er laget i Photoshop	44
8.6	Den øverste delen av den østliggende fasaden. Bildet er laget i Photoshop	44
8.7	Den nederste delen av den østliggende fasaden. Bildet er laget i Photoshop	44
8.8	Solceller på den østliggende fasaden med Series 6. Bildet er laget i Photoshop	45
8.9	Utsnitt av kjelleren på Aula-bygget. Rødt avgrenset område viser batterirommet. Bildet er hentet fra Rambøll.	47
8.10	Flytbatteriskap fra Bryte. Bildet er hentet fra brytebatteries.com [130]	49
8.11	LFP batteriskap fra Pixii. Bildet er hentet fra pixii.com [133]	50
8.12	Batteriskap fra Evyon. Bildet er hentet fra evyon.com [141]	52
8.13	To forslag fra Evyon til batterikonseptet til Trondheim Katedralskole. Bildet er blitt tilsendt fra Evyon av Dag Henriksen	53
8.14	Utslippssammenligning i mellom flytbatterier og nye litiumionebatterier, hentet fra Bryte [115]	57
8.15	Figuren viser COP verdier gjennom året for Annex 03-H/C. Bildet er laget i MATLAB, se vedlegg G	60
8.16	Figuren til venstre viser semi-opaque solceller, mens figuren til høyre viser semi-transparente solceller og er hentet fra IOPscience [154]	61
8.17	Figuren viser et eksempel på en Double skin fasade (DSF) løsning og er hentet fra artikkelen Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs) fra Science Direct [155]	62
9.1	Figuren viser energiforbruk gjennom året og er hentet fra PVSyst	65
9.2	Figuren viser årsproduksjon fra solceller fra øst og sør fasade fra Series 6 og Maxeon 3 og er hentet fra PVSyst	68
9.3	Figuren viser tapdiagram for de fire valgte scenariene og er hentet fra PVSyst	69
9.4	Figuren viser den daglige produserte energien fra solcellene gjennom året for de fire valgte scenariene og er hentet fra PVSyst	70
9.5	Figuren viser den produserte solcelleenergien sammenlignet med den brukbare solcelleenergien for de fire valgte scenariene og er hentet fra PVSyst	71
9.6	Figuren viser energiproduksjonen fra solceller for de fire valgte scenariene sammenlignet med energibehovet og er hentet fra PVSyst	72

Tabeller

2.1	Verdier for å oppfylle minimumskrav i TEK17 [31]	3
2.2	Verdier for å bestemme krav til netto spesifikt energibehov til oppvarming [37].	4
2.3	Kjølebehovskoeffisient for å bestemme kravet til netto spesifikt energibehov til kjøling i et passivhus [37].	5
2.4	Verdier for å oppfylle krav til passivhus i henhold til NS 3701:2012 [23].	5
2.5	Minstekrav til bygningsdeler, komponenter og lekkasjetall for passivhus i henhold til NS 3701:2012 [23, 37].	5
2.6	Oversikt over ulike ZEB-ambisjonsnivå. Det følger en systemgrense til hvert nivå som beskriver kravene for at ambisjonsnivå skal bli oppfylt [40].	6
3.1	Energiforsyning i prosjektet [23]	14
3.2	Lvert energi av hvert system [23]	14
8.1	Totalt GWP per solcellepanel i $kg CO_2 eq/Wp$	37
8.2	Beregninger med Maxeon 3 og Series 6 ved $132 kWp$	39
8.3	Oversikt over VVS utstyr på taket på Trondheim Katedralskole og deres beregnende verdier	40
8.4	Takdimensjoner med areal og brukbart areal til solcellepanel for 3 m fra takkant	40
8.5	Takdimensjoner med areal og brukbart areal til solcellepanel for 1 m fra takkant (forskrift 712C.2.3)	40
8.6	Dimensjonene til solcellepanel: First Solar Series 6	43
8.7	Dimensjonene til sør fasade ved bruk av Series 6	43
8.8	Dimensjonene til øst fasade ved bruk av Series 6	45
8.9	Dimensjonene til solcellepanel: Maxeon 3	45
8.10	Dimensjonene til sørfasade med Maxeon 3	46
8.11	Dimensjonene til østfasade med Maxeon 3	46
8.12	Sammenligningsparametre til ulike batteriteknologier	54
9.1	Årlig strømforbruk for Trondheim Katedralskole gitt av Rambøll og beregnet elektrisk strømforbruk som skal dekkes av solceller.	64
9.2	Produksjon fra fasader uten batterier	65
9.3	Produksjon fra tak med batterier	66
9.4	Produksjon fra tak uten batterier	66
9.5	Produksjon fra tak og fasade uten batterier	66
9.6	Produksjon fra tak og fasade med batterier	66

9.7	Oversikt over antall moduler og serier i de ulike løsningene	67
9.8	Levert energi av hvert system [23]	72
9.9	Utslipp fra solceller i de ulike scenarioene	73
9.10	Resultater fra batteridelen som viser hvilken batteriteknologi som best oppfyller de forskjellige parametre.	73

1 Innledning

Klimaendringer er en stor trussel på verdensbasis. En viktig forutsetning for å stanse klimaendringene er å fokusere på å minske klimagassutslipp. Trøndelag fylkeskommune har som mål å bli klimanøytral innen året 2030. Det innebærer at fylkeskommunen må kutte ned 50-55 % av klimagassutslipp innen samme år. [20] På verdensbasis står bygg for omtrent 40 % av klimagassutslippene [21]. Renovering og bygging av klimanøytrale bygg er derfor et viktig tiltak for å kutte ned utslipp. Trøndelag fylkeskommune ønsker at klimabelastning fra energibruk, byggeplass og materialbruk i bygg blir halvert innen 2030. Det stilles krav om klimanøytralitet og nullutslipp med ambisjon om plussenergi ved gjennomføring av prosjekter innen nybygg og større rehabiliteringer. [20]

Denne bacheloroppgaven tar utgangspunkt i valg av energiforsyningsalternativer og klimanøytralisering av nybyggene til Trondheim Katedralskole, også kalt Katta. Skolen består av 5 bygninger fra ulike tidsperioder. Det eldste bygget er Harsdorff og ble bygd i 1786. Senere kom Moe I og Moe II i løpet av 1920- og 1930-årene. B-bygg og Aula ble begge bygd rundt 1960-tallet. Noen av byggene er tidligere blitt innvendig renoveret. Trøndelag fylkeskommune har uttrykt et ønske om renovering og utbygging av Trondheim Katedralskole. Av den grunn skal B-bygget rives ned og erstattes av en nyere bygning. I tillegg skal det bygges et Midtbygg og en kantine. Midtbygget skal kobles til Moe-byggene gjennom en glassbro.

Målet med prosjektet er at nybyggene skal ha en klimagassreduksjon på 45 % sammenlignet med et referansebygg fra 2015 [22]. Det arbeides også mot kravene om Zero Emission Building Operation (ZEB-O), altså nullutslippsbygg i driftsfasen. For å oppnå dette skal gruppen undersøke ulike alternativer for solcelleimplementering på nybyggene i en kombinasjon med energilagring. De eldre byggene skal ikke ha et solcelleanlegg grunnet at de er verneverdige. Når entreprenøren overleverer bygget skal det dokumenteres at prosjekterte løsninger for fornybar energiproduksjon veier opp for energibehovet til drift av bygget, altså tilfredstille ZEB-O krav [22].

Oppgavens disposisjon starter med en innføring i energieffektive bygninger og Trondheim Katedralskole prosjektet. Det vises til lover og regler som må følges for å oppnå kravene stilt av Trøndelag fylkeskommune. Videre går oppgaven i dybden på solcelle- og energilagringmuligheter. Ulike løsninger for prosjektering presenteres og det blir gjort beregninger knyttet til disse. Resultater analyseres og det blir konkludert med en løsning som møter kravet til ZEB-O, og ikke minst er mest miljøvennlig og passende for dette prosjektet.

2 Energieffektive bygninger

Energikravene i dette prosjektet er ambisiøse og det stilles strenge krav til brutto energibehov og ZEB-O. Nybyggene må ivareta energikrav i *Byggeteknisk forskrift* TEK17 §14 og ikke minst krav for passivhus. Dette prosjektet har som mål og krav at nybyggenes brutto energibehov ikke skal overstige 40 kWh/m^2 år. I tillegg skal den lokale produksjonen av fornybar energi tilfredstille ZEB-O krav. Bygningene er vurdert som bygningskategori ”skolebygning” og deler av både B-bygget og Midtbygget faller under kategori ”idrettsbygning”. [23]

2.1 Bygningens klimaskall

Bygningens klimaskall er sammensetningen av komponenter som utgjør det utvendige skallet til et bygg [24]. Klimaskallet separerer det innvendige og utvendige miljøet og er dermed utsatt for flere ulike faktorer som temperaturendringer, luftbevegelser, regn og solstråling. Et godt planlagt og gjennomført klimaskall skal ikke ha luftlekkasjer. Luftlekkasjer i ytre skallet kan føre til kondens og oppfuktning av konstruksjonen og dermed svekke ytterkonstruksjonen og klimaskallet. Det samme gjelder vind, som i kombinasjon med slagregn kan føre til fuktskader på bygningens klimaskall. [25]

En spesielt viktig parameter for bygningens klimaskall er U-verdi. U-verdi er varmegjennomgangstall i en bygningskomponent [26]. Med andre ord forteller U-verdi noe om varmeisoleringsnivåen til en bygningsdel. Det er U-verdien som forteller hvorvidt et bygg har god nok isolasjonstykkelse, samt lav konduktivitet [25]. Det stilles krav til U-verdier i ulike forskrifter, da de er sentrale komponenter ved planlegging av en bygningskropp [27, 28]. Det er også flere standarder som brukes ved beregning av bygningsdelenes U-verdier, som for eksempel NS-EN ISO 6946 eller NS-EN ISO 13370 [25].

I dette renoveringsprosjektet skal Moe-byggene og Aula bygget gjennomgå en innvendig oppussing. Dette skal styrke klimaskallets motstand til luftlekkasjer, altså minske U-verdiene i konstruksjonen. Dette vil gjøre de eldre byggene mer energieffektive. Denne oppgaven fokuserer hovedsakelig på nybygg. TRFK har utarbeidet prosjektspesifikk kravspesifikasjon for nybyggene. Der står det blant annet at alle U-verdier skal være ifølge NS 3701:2012 eller bedre og at konstruksjonsløsninger skal holde unna kondens og fuktskader under hele prosjekteringsperioden. [23]

For å oppnå et energieffektivt klimaskall i et bygg er det fem hovedkomponenter som bør vurderes. Disse er som følge [29]:

- Optimalisere det termiske skallet.
- Sikre riktig installasjon av de gjennomslipende bygningskomponentene (vinduer, glassvegger).
- Forsikre seg at konstruksjonen er, så langt det lar seg gjøre, fri for kuldebroer.
- Forsikre seg at bygningens klimaskall er lufttett.
- Installere helst en balansert, mekanisk ventilasjonssystem med varmegjenvinning.

Optimalisering av det termiske skallet må tilpasses klimasted. Ettersom dette prosjektet foregår i et kaldt klimasted vil de riktige tiltakene her være å minimere varmetap gjennom konstruksjonen og ikke minst ta i bruk varmen som en får gjennom solinnstrålingen. Det er likevel viktig å passe på at varmen fra solinnstrålingen ikke skaper overhetingsproblemer, selv i et kaldt klimasted. Det er også avgjørende å sikre riktig installasjon av de gjennomslipende bygningskomponentene slik at det ikke oppstår noen lekkasjer mellom vinduer og isolasjonen, som vil kunne bidra til varmetap. [29]

Det er også viktig å unngå kuldebroer. Kuldebroer er når et sted i konstruksjonen har betydelig lavere varmemotstand enn komponentene rundt [30]. Kuldebroer fører til økning av den gjennomsnittlige U-verdien og ikke minst lokale varmetap og diskomfort knyttet til temperaturendringer [25, 29]. Lufttetthet i klimaskallet til bygget vil kunne redusere varmetap knyttet til infiltrasjon og sørge for at det ikke oppstår noen uønskede endringer i konstruksjonen grunnet luftlekkasje. Til slutt er det viktig å sørge for at bygget har et godt ventilasjonssystem med varmegjenvinning for å gjenvinne store mengder av varmen i uteluften og for å gi tilgang på frisk luft. Ettersom en lufttett bygningskropp fører til at begrensende mengder frisk luft vil komme inn i bygget naturlig. [29]

2.2 Byggteknisk forskrift TEK17

Det er flere krav knyttet til nullutslippsbygg. Noen av disse følger de vanlige tekniske forskrifter som blant annet "Veiledning om tekniske krav til byggverk" - TEK17. TEK17 tar for seg minimumkrav for et bygg som må være tilfredsstilt for at en bygning skal kunne være lovlig i Norge. TEK17 tar for seg alt fra konstruksjonssikkerhet, inneklima og helse til energi, klima og livsløp. Dersom noen spesifikke krav ikke er oppført i eget regelverk for nullutslippsbygg, brukes det minimumkrav fra TEK17. [31]

I dette prosjektet er krav fra § 14 – 2 - Krav til energieffektivitet og § 14 – 5 - Unntak og krav til særskilte tiltak - mest relevante og skal tilfredstilles. § 14 – 2 stiller blant annet krav til årlig netto energibehov per oppvarmet bruksareal (BRA). Dette er $110 \text{ kWh}/\text{m}^2$ for skolebygning og $145 \text{ kWh}/\text{m}^2$ for idrettsbygning [32]. § 14 – 3 tar for seg minimumskrav til energieffektivitet, og § 14 – 4 nevner ulike krav til energiforsyningsløsninger.

Det er også gitt, i energikonseptet fra Rambøll, at det er noen preaksepterte ytelser slik som:

- "Energifleksible systemer må dekke minimum 60 % av normert netto varmebehov, beregnet etter NS 3031:2014, lavtemperatur varmeløsninger må ha turtemperatur på 60°C eller lavere ved dimensjonerende forhold. Dette gjelder ikke for varmt tappevann" [23].
- "Minimumareal avsatt til varmesentral skal beregnes etter formelen: $10 \text{ m}^2 + 1 \%$ av BRA, opptil 100 m^2 " [23].
- "Takhøyden i rom for varmesentral skal være minimum 2.5 meter" [23].
- "Fri bredde for alle dører i transportveien inn til varmesentralen skal være minimum 1.0 meter" [23].

Prosjektet tar også hensyn til minimumskrav til energieffektivitet, altså § 14 – 3 i TEK17. Minimumskrav i form av U-verdier må oppfylles. Disse er mulig å se i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Verdier for å oppfylle minimumskrav i TEK17 [31]

U-verdi yttervegg [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	U-verdi tak [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	U-verdi gulv på grunn og mot det fri [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	U-verdi vindu og dør inkludert karm/ramme [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell [luftveksling per time]
≤ 0.22	≤ 0.18	≤ 0.18	≤ 1.2	≤ 1.5

2.3 Passivhus

Passivhus er et hus som har implementert mange tiltak som minsker byggets totale energibehov og øker termisk komfort. Energiforbruket i et passivhus er mye lavere enn i et vanlig hus. [33] Passivhus standard skiller mellom to standarder NS3700 - for passivhus og lavenergiboliger - og NS3701 for næringsbygg. Alle energiberegninger knyttet til passivhus og lavenergibygg gjøres i henhold til standard NS3031. [29, 34] NS3031 er en standard som omfatter beregningsalternativer for bygningens energiytelse. Denne standarden er trukket, men brukes imidlertid fortsatt opp imot TEK17, NS3700 og NS3701 [35].

I denne oppgaven fokuseres det på NS3701:2012 da Trondheim Katedralskole regnes som et næringsbygg. For passivhus gjelder kravet om at det totale oppvarmingsbehovet og kjølebehovet ikke skal overstige $15 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{ år}$ [36]. Dette gjelder både for skole- og idrettsbygg. Nybyggene til Trondheim Katedralskole skal tilfredsstillende krav til passivhus i henhold til NS3701. Standard NS3701:2012 viser at krav for høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming for et sted med årsmiddeltemperatur $< 6.3^\circ\text{C}$ og oppvarmet del av BRA $< 1000\text{m}^2$ er gitt ved ligning 1 [37]. I standarden står det også oppgitt verdier for de ulike komponentene i ligningen. Dette er mulig å se i tabell 2.2.

$$EP_{H,0} + X \frac{1000 - A_{fl}}{100} + (K_1 + K_2 \frac{1000 - A_{fl}}{100})(6.3 - \theta_{ym}) \quad (1)$$

$EP_{H,0}$	= basis netto spesifikt oppvarmingsbehov	[kWh/(m ² · år)]
X	= arealkoeffisient for oppvarmingsbehov	[kWh/(m ² · år)]
A_{fl}	= oppvarmet del av BRA	[m ²]
K_1	= klimakoeffisient for oppvarmingsbehov	[-]
K_2	= klimakoeffisient for oppvarmingsbehov	[-]
θ_{ym}	= årsmiddeltemperatur	[°C]

Tabell 2.2: Verdier for å bestemme krav til netto spesifikt energibehov til oppvarming [37].

	Skolebygning	Idrettsbygning
$EP_{H,0}$	20	20
X	1.30	0.80
K_1	3.5	3.8
K_2	0.15	0.10

På samme måte er det egne krav for beregning av netto spesifikt energibehov til kjøling. Da tas det utgangspunkt i dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold (DUT_s) $> 20^\circ\text{C}$. Da fremgår det av NS 7031:2012 at høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling beregnes ved bruk av ligning 2. Der står β for kjølebehovskoeffisient og DUT_s er, som nevnt tidligere, dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold. Tabell 2.3 viser oversikt over kjølebehovskoeffisientene for skole- og idrettsbygning. [37]

$$\beta(DUT_s - 20) \quad (2)$$

Tabell 2.3: Kjølebehovskoeffisient for å bestemme kravet til netto spesifikt energibehov til kjøling i et passivhus [37].

	β
Skolebygning	0.75
Idrettsbygning	0.90

Tabell 2.4 viser verdier for Trondheim Katedralskole i henhold til standard NS 3701:2012. Disse verdiene er beregnet av Rambøll i Trondheim og er brukt som grunnlag til videre beregninger i dette prosjektet.

Tabell 2.4: Verdier for å oppfylle krav til passivhus i henhold til NS 3701:2012 [23].

	Skolebygning	Idrettsbygning
Høyeste beregnede netto spesifikt energibehov for oppvarming	24.0 kWh/m ²	24.4 kWh/m ²
Høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling	3.3 kWh/m ²	4.0 kWh/m ²

Det er også satt tilleggskrav, i tillegg til tabell 2.4, som omhandler bygningsdeler, komponenter og lekkasjetall. Disse er spesifikke for passivhus, og hentet fra NS 3701:2012. De minste tilleggskravene er mulig å se i tabell 2.5.

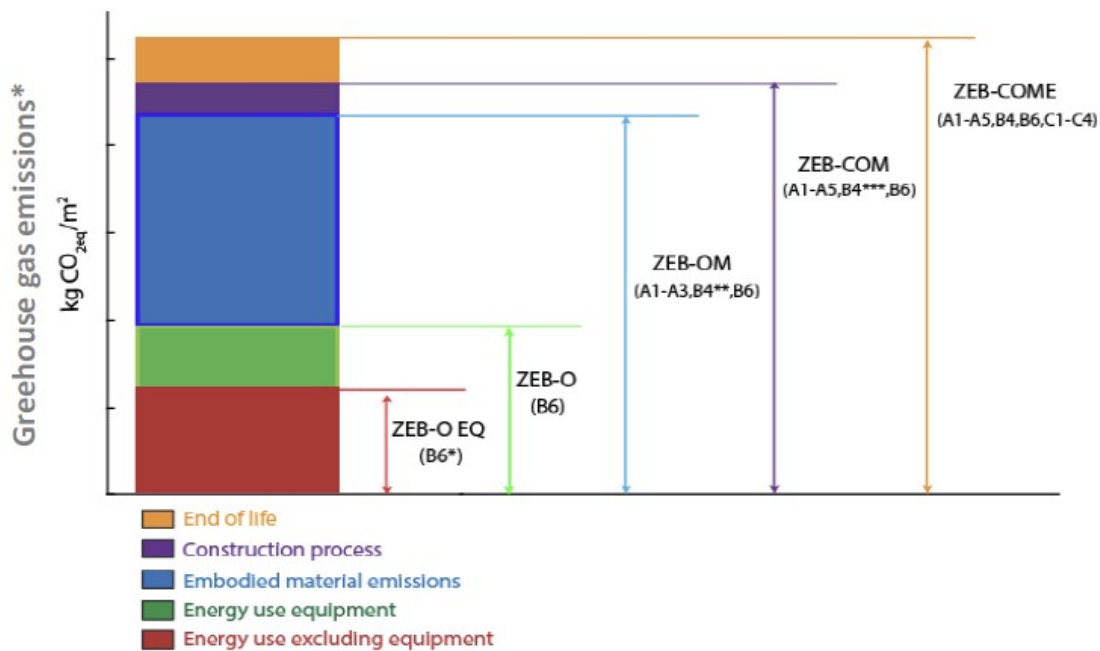
Tabell 2.5: Minstekrav til bygningsdeler, komponenter og lekkasjetall for passivhus i henhold til NS 3701:2012 [23, 37].

Egenskap		Passivhus
U-verdi vindu og dør		$\leq 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$
Normalisert kuldebroverdi		$\leq 0.03 \text{ W/m}^2\text{K}$
Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner		$\geq 80 \%$
SFP-faktor ventilasjonsanlegg		$\leq 1.5 \text{ kW/m}^3\text{s}$
Lekkasjetall ved 50 Pa, n_{50}		$\leq 0.6 \text{ h}^{-1}$
Belysning	Dynamisk dagslys- og konstantlysstyring	Minst 60 % av installert effekt til belysning er underlagt styringssystemet
	Dynamisk behovsstyring ved tilstedeværelse	Minst en styringssone per rom eller en styringssone per 30m ² i større rom

2.4 Nullutslippsbygg - ZEB

Det norske forskningscenteret - FME ZEB (Forskningscenter for Miljøvennlig Energi Zero Emission Buildings) jobber med å fjerne klimagassutslipp som er tilknyttet byggebransjen. Senteret har et ønske om å fremme Norge på forskning knyttet til nullutslippsbygg og energieffektive bygg. ZEB-senteret har kommet med en definisjon på nullutslippsbygg som forteller at det er et bygg med "Null klimagassutslipp knyttet til produksjon, drift og avhending av bygget" [38, 39]. Figur 2.1 og tabell 2.6 viser oversikt over ulike ambisjonsnivåer knyttet til ZEB og deres systemgrenser. De ulike forkortelse i ambisjonsnivåene står for: O - Operation (driftsfase), EQ - Equipment (utstyr), M - Materials (materialer), C - Construction (konstruksjon) og E - End of life (slutfase) [40]. I denne oppgaven skal det oppnås nivå "ZEB-O". Konkrete og prosjektspesifikke ZEB tiltak er listet opp under miljøoppfølgingsplanen,

altså kapittel 3.1.2.



* Greenhouse gas emissions are calculated as kg CO₂-equivalents per m² heated floor area per year (distributed over a 60 years life time)

Figur 2.1: Oversikt over ZEB ambisjonsnivåer beskrevet i tabell 2.6 satt i sammenheng med livsløpsfaser. A1-B6 beskriver livsløpsstadier. Bildet er hentet fra ZEB Project report 29 - 2016 [40].

Tabell 2.6: Oversikt over ulike ZEB-ambisjonsnivå. Det følger en systemgrense til hvert nivå som beskriver kravene for at ambisjonsnivå skal bli oppfylt [40].

Ambisjonsnivå	Forklaring - Systemgrense
ZEB-O ÷ EQ	Kompenserer for klimagassutslipp fra drift av bygningen uten å ta hensyn til energi som blir brukt til utstyr.
ZEB-O	Kompenserer for klimagassutslipp fra bygningens driftsfase.
ZEB-OM	Kompenserer for klimagassutslipp fra bygningens driftsfase, samt utslipp fra materialbruken.
ZEB-COM	Kompenserer for klimagassutslipp fra bygningens driftsfase, samt utslipp fra materialbruken og konstruksjonen av bygget.
ZEB-COME	Kompenserer for klimagassutslipp fra bygningens drifts- og slutfase, samt utslipp fra materialbruken og konstruksjonen av bygget.
ZEB-COMPLETE	Kompenserer for klimagassutslipp fra bygningens hele livssyklus.

2.5 Klimamål og lovgivning

I Europa har omtrent 85 % av bygningene blitt bygd før 2001. Det vil si at de fleste byggene som finnes i Europa i dag ikke er energieffektive. Dette er en stor utfordring i energi- og byggbransjen da omtrent 85-95 % av disse byggene fortsatt kommer til å stå innen 2050. Bygningene står for omtrent 40 % av total energiforbruk i Den europeiske union (EU). 36 % av klimagassutslipp som stammer fra energi innad i EU, kommer nettopp fra ikke energieffektive bygg. [41]

For å ta tak i problemene, har flere land gått sammen om å skrive Parisavtalen. Denne avtalen er en internasjonal klimaavtale som angår totalt 189 land og omhandler styrking av arbeid med å motvirke

klimaendringer på tvers av land [42]. I løpet av samme år som Parisavtalen ble vedtatt, ble det også vedtatt 17 bærekraftsmål under FNs generalforsamling. Målene skal bidra til bærekraftig utvikling i årene som kommer og frem mot år 2030. [43] I denne oppgaven spiller mål 13 ”*Stoppe klimaendringene*” sentral rolle og nevnes i prosjektets klimagassregnskap. I tillegg kan målene 7 ”*Ren energi til alle*”, 9 ”*Industri, innovasjon og infrastruktur*” og 11 ”*Bærekraftige byer og lokalsamfunn*” trekkes frem som sentrale mål som det arbeides mot i denne oppgaven.

For å nå sine klimamål har Europakommisjonen laget egen pakke - *Clean Energy for All Europeans* - som fokuserer på energieffektivisering, økning i bruk av fornybare energikilder, forbedringer knyttet til regelverket, gi kundene mer frihet knyttet til strømproduksjon og ikke minst øke forsyningssikkerhet ved å gjøre energimarkedet smartere og mer energieffektivt [44]. Byggebransjen er dermed et fint sted å starte grunnet mye utviklings- og forbedringspotensiale. For å nå Netto Null Scenario (Net Zero Scenario) er det nødvendig at alle nybygg og renoveringer skal bli klare til å bli nullutslippsbygg innen året 2030 [45].

Byggebransjen har blitt et stort fokus for Den europeiske union og dens medlemsland i et felles mål om å motarbeide klimaendringer. Det satses derfor på passivhus standarder og nullutslippsbygg i mye større grad. Det finnes et eget institutt - *The Buildings Performance Institute Europe* (BPIE) - som jobber med å sørge for at EUs direktiver knyttet til energiytelse blir fulgt opp. Likevel har Den europeiske unionen ingen internasjonale byggekrav rettet mot energibruken i bygninger og påstår at alle land har selv ansvar for å følge opp deres anbefalinger. [29]

Den europeiske union har forpliktet seg til å redusere sine utslipp med 55 % innen året 2030. Denne forpliktelsen er bakgrunnen for en pakke som heter *Fit for 55* som skal revidere og oppdatere EUs nåværende lovgivning for å gjøre det enklere å nå klimamålene i tide. [46] Et av foreslåtte tiltak i Fit for 55-pakken er å revidere et direktiv som omhandler energiytelse i bygninger. Der skal fokuset være rettet mot energieffektivisering av bygningsmassen og ikke minst reduksjon i klimagassutslippene. Et viktig forslag som kommer frem er at alle nye bygg skal være nullutslippsbygg (ZEB) innen 2030. I tillegg kommer det forslag om felles energimarkering for bygg på tvers av land og reglene for energimarkering skal bli strengere. [47] EUs direktiv om energiytelse i bygninger skal ha gått gjennom i mars 2023 [48].

Tiltakene nevnt ovenfor er bare noen blant mange. EU satser i høy grad på å oppdatere sine lover og standarder, og ikke minst sette i gang flere direktiver som vil være veiledende for dens medlemsland. Flere av disse endringene angår i stor grad bygningsmassen i Den europeiske union, ettersom den har meget stor forbedringspotensiale. [49] EUs endringer knyttet til oppgradering av bygningsmassen vil angå Norge i høy grad [48].

3 Trondheim Katedralskole

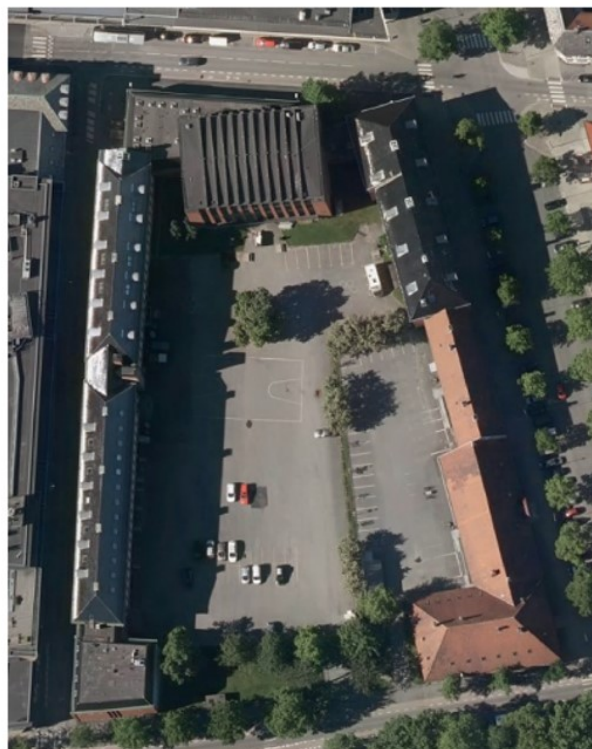
Trondheim Katedralskole er et av de eldste skolene i hele Norge [50]. Med en lang historie har skolen allerede hatt en stor innvirkning på miljøet. Grunnet dette stilles det strenge krav for hva som er lov å gjøre i dette prosjektet. Flere av byggene har vernestatus og det er et ønske om at nybyggene skal beholde det gammeldagse utseende. Dette kapitlet gir en introduksjon til prosjektet og aktuell regelverk.

3.1 Om prosjektet

Trondheim Katedralskole ligger i sentrum av Trondheim i Trøndelag fylkeskommune. Den har en sentral plassering i mellom Rådhuset i Trondheim, Nidarosdomen, og fylkeskommunens og kommunens kontorer. Skolen ble grunnlagt i 1152. I 1708 brant den ned og i 1782 stod den oppreist igjen. I 1786 stod Harsdorffbygget ferdig og i 1925 og 1938 kom de to Moe-bygningene i lik stil, tegnet av arkitekt Carl J. Moe. Til slutt ble B- og Aula-bygget tegnet av Knut Bergersen og oppført i 1959 og 1964. Katedralskolen vises i figur 3.1. [51, 52]



Planområdet, 1957. Bygningsmassen før Aulabygget oppføres strekker seg inn i gårdsrommet.



Planområdet i dag.

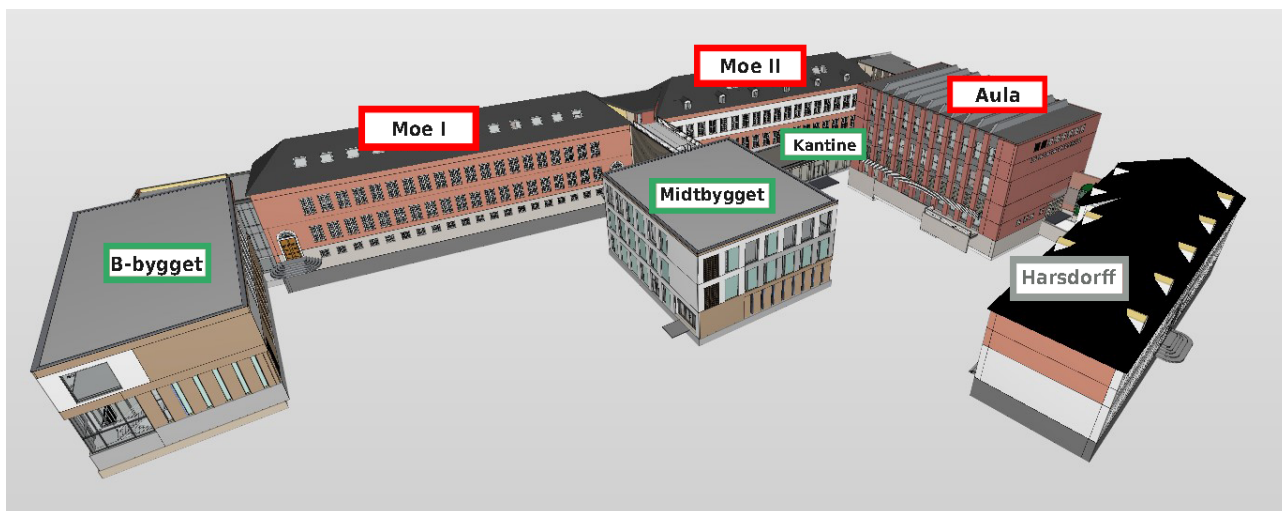
Figur 3.1: Planområdet av Trondheim Katedralskole fra 1957 (venstre) og 2022 (høyre). Bildet er hentet fra *Bygningsfysisk konseptrapport* fra Rambøll [53]

Det er planlagt en stor renovasjon av skoleområdet. Et av byggene skal rives og det kommer tre nybygg som da skal implementeres til de eksisterende byggene. I tillegg skal de eldre byggene pusses opp innvendig. Det blir fokus på etterisolasjon og andre tiltak som bedrer bygningenes varmeoverføringstall og gjør bygget mer kostnadseffektivt og miljøvennlig. Skolen er i bruk, og planen var at den skulle forbli det under hele renovasjons- og byggeperioden. Etter lydtester gjennomført av entreprenøren har det

blitt konkludert med at støynivået er for høyt og elevene må derfor omplasseres under byggeperioden.

3.1.1 Prosjektet

Trøndelag fylkeskommune er byggeherren i dette prosjektet. Betonmast har blitt valgt som entreprenør av byggeherren. Videre har entreprenøren valgt å samarbeide med rådgiverfirmaet - Rambøll i Trondheim. Hele prosjektet tar for seg innvendig rehabilitering av eksisterende bygg, i tillegg til bygging av tre nye bygg. Det gamle B-bygget skal rives ned og det skal bygges et nytt B-bygg, et Midtbygg og en kantine. Harsdorff-bygget holdes utenfor prosjektet ettersom bygget er fredet. Figur 3.2 viser en plantegning over hvordan Trondheim Katedralskole skal se ut med nybygg og eksisterende bygg.



Figur 3.2: 3D tegning av de nybyggene (grønn ramme) kombinert med eksisterende bygg (rød og grå ramme). Bildet er hentet fra en fil fra Rambøll, fra 3D programmet Solibri

Målet med nybyggene til skolen er at de skal oppfylle nullutslippsbyggs krav ved driftsfasen, altså ZEB-O krav. For å oppnå disse kravene er det fokus på at bygningene skal ha en lokal energiproduksjon. Denne skal være tilpasset til energibehovet, slik at energiimport og -eksport kan begrenses i størst mulig grad. For å få til dette skal det monteres et eget solcelleanlegg på taket til B-bygget og Midtbygget. Det skal også vurderes fasadeløsninger på Midtbygget for å øke produksjonen i løpet av vinterperioden. De eldre byggene skal ikke ha solceller da det er noe usikkerhet tilknyttet hvor mye vekt taket kan tåle, og er det lovbegrensninger knyttet til at de er bevaringsverdige. Kantinen og glassbroen skal ikke ha solceller på taket da de er dekket med skygge mesteparten av tiden.

En utfordring i prosjektet er at solcelleanlegget produserer mest energi om sommeren, da skolen ikke er i bruk. På samme måte produserer anlegget minst da forbruket og behovet er størst. Av den grunn er det veldig viktig å fokusere på energilagring- og energidelingsmuligheter i området. Det vurderes både lagring av energien i batterier, deling med nabobygg og ikke minst utforske skylagringsmuligheter på det norske kraftmarkedet. Energideling på tvers av tomtgrenser er sterkt begrenset av den norske loven og må undersøkes nøye før en eventuell igangsetting. Det er et ønske om å undersøke løsninger og resultater fra lignende prosjekter, som da baserer seg på Zero Emission Neighbourhoods - ZEN.

Ved beregning av klimafotavtrykket til bygget benyttes det en levetid på 60 år. Resultatet skal være minimum 45 % lavere enn fra referansebygget. Referansebygg er en bygning fra 2015 bygget etter minste kravene på det tidspunktet.

3.1.2 Miljøoppfølgingsplan - MOP

Bygningene i denne oppgaven skal oppfylle prosjektspesifikke krav i miljøoppfølgingsplanen (MOP). I dette prosjektet er det fokus på krav som omfatter brutto energibehov og ZEB-O. Blant de viktigste energikravene finner en at nybyggsarealets brutto energibehov ikke skal overstige $40 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{år}$. Dette skal helst holdes så lavt som mulig for at kravet om ZEB-O skal kunne oppfylles enklere. I tillegg skal klimagassutslipp fra byggets driftsfase kompenseres for gjennom egenproduksjon fra et solcelleanlegg plassert innad tomtegrensene. Nybyggene skal i tillegg tilfredstille alle krav til passivhus i henhold til NS 3701:2012.[22]

For at byggene skal bli så energieffektive som mulig, skal de ha lavest mulig U-verdi (varmegjennomgangskoeffisient) og lekkasjetall, og ikke minst skal de være lufttette, slik at varmen ikke forsvinner. Ettersom dette prosjektet fokuserer på energiberegninger, blir det ikke gått i dybden på flere andre tiltak som må til for å holde byggene energieffektive, disse blir kun nevnt.

MOP stiller krav til klimaskallet ved å begrense U-verdier til yttervegg, gulv og tak. Gjennomsnittlig verdi til disse skal være på henholdsvis $\leq 0.12 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, $\leq 0.08 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ og $\leq 0.09 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. I tillegg skal lekkasjetall være $\leq 0.30 \text{ h}^{-1}$. Det stilles egne U-verdi krav til komponenter som vinduer, dører og porter på henholdsvis $\leq 0.75 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, $\leq 0.85 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ og $\leq 1.20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Dette er også gjennomsnittlige verdier. Disse kravene skal, så langt det lar seg gjøre, gjelde ombygd areal, uten at det går utover vernestatusen til byggene. [22]

Det skal også gjennomføres termografering og trykktesting etter montering av vindspærre, med fokus på utfordrende områder. Dette skal kartlegge behov for eventuelle utbedringer før montering av kledningen. En lignende termografering og trykktesting skal også gjennomføres på tilnærmet ferdige bygg for å avdekke eventuelle feil og mangler av betydning for leveransen. Det stilles i tillegg krav til ventilasjonsanlegget. SFP (Specific Fan Power) faktoren for nybyggene og allerede eksisterende bygg skal, så langt det lar seg gjøre, ikke overstige $0.9 \text{ kW}/\text{m}^3/\text{s}$ i løpet av driftstiden og $0.45 \text{ kW}/\text{m}^3/\text{s}$ utenfor driftstiden. Disse tallene gjelder som årsgjennomsnitt. Varmegjenvinneren må i tillegg ha en temperaturvirkningsgrad på 85 % eller mer. Til slutt nevner MOP-en også dagslysfaktor og energieffektiv belysning, da disse også er meget viktig for det endelige resultatet. [22]

Videre nevner MOP-en at der det allerede finnes fjernvarme skal denne brukes dersom ingen andre mer miljøvennlige oppvarmingsalternativer finnes [22]. I dette prosjektet er de eldre byggene allerede tilknyttet fjernvarmenettet og dette anses som miljøvennlig ettersom det ikke krever en større utbygging. Fjernvarme alene vil ikke kunne dekke hele oppvarmingsbehovet til byggene. For å oppnå ZEB-O krav er det da nødvendig å ta i bruk en luft-til-vann varmpumpe. [22]

Miljøoppfølgingsplanen går videre inn på at prosjektet må bidra med lokalproduksjon av fornybar energi. I dette tilfellet anses solenergi som mest relevant og skal bidra med minimum 40 % av den totale lokale energiproduksjonen, både elektrisk og termisk, målt i produsert kWh . I tillegg skal energiproduksjonen optimaliseres med tanke på lokal bruk av energien og ikke minst ved energilagring. [22] Dagens lovverk gjør det vanskelig å bruke egenprodusert energi på tvers av strømmålere. Likevel er lovene i endring, og sannsynligvis innen at dette byggeprosjektet er ferdigstilt, vil det gjelde nye regler som tillater deling av egenprodusert strøm innad et gårdsnummer, selv ved flere strømmålere. Dette endringsforslaget er allerede sendt til høring. [54]

MOP fokuserer også på energilagring, både elektrisk og termisk. Begge anleggene skal dimensjoneres etter behovet gjennom året. Anlegget skal altså klare å lagre energi på sommerhalvåret når behovet er lite. I tillegg skal den lagre den billige energien i lavlasttider på vinterhalvåret og bidra til utjevning av effekttopper ellers. Elektrisk batterianlegg skal dekke minimum 30 % av effektbehovet i driftstime og levere minimum 75 kW effekt med en batterikapasitet på 350 kWh . For termisk energilagring gjelder det å planlegge en dynamisk termisk lagring eller en løsning med PCM (Phase Change Material -

faseendringsmaterialer). [22]

En utfordring som er påpekt i MOP-en er plassering av batterianlegget. TRFK ønsker at plasseringen skal ta hensyn til brannsikkerhet kravene, og det er stilt krav om plassering i nærheten av hovedinntaket til elkraft. Rambølls brannrådgiver forteller at batterianlegget bør plasseres på bakkeplan og at batterirommet bør være i en egen branncelle. Likevel er det ikke noen konkrete krav utenom disse. Leder for teamet med energirådgivere ved HENT AS, som har erfaring fra et lignende prosjekt ved Tiller vgs, understreker at dagens lovverk tilknyttet brannsikkerhet i batterirom ikke er tilstrekkelig og bør utbedres. Dette fremgår i møtereferatet i vedlegg B.

I miljøoppfølgingsplanen står det skrevet at Trøndelag fylkeskommune ønsker å få en vurdering av energiprofilen til nybyggene. Energiprofilen skal vurderes med fokus på energiutveksling med andre enheter i nærområdet. Etersom TRFK er en partner i FME ZEN, anbefales det å drøfte muligheter for gjennomføring av lignende kriteriesett som i pilotprosjektet på Mære Landbruksskolen, også i dette prosjektet. Utveksling av overskuddsenergi med bygg i nærområdet kan vurderes, men det stilles strenge krav for gjennomføring av slike oppdrag. [22, 55]

Entreprenøren i dette prosjektet er pålagt å følge en EPC (Energy Performance Contracting) kontrakt, noe som betyr at entreprenørbedriften er forpliktet til å garantere energimål og ytelse. Dersom det i løpet av de første 5 årene etter overlevering oppstår komplikasjoner knyttet til energimål, står entreprenøren ansvarlig for å rette opp i dette. Dette fremgår i møtereferatet fra møte med fagsjef og gruppeleder for bærekraftige bygg i Trøndelag fylkeskommune - Torger Mjønes - som er mulig å se i vedlegg A.

For å få et reelt bilde av ZEB-O, krever TRFK at det skal utarbeides et klimaregnskap for materialbruk i nybyggene. Dette skal følge en IFC-modell av nybyggene basert på en levetid på 60 år. Klimafotavtrykket skal sammenlignes med et referansebygg fra 2015. Nybyggene skal ha en reduksjon på minst 45 % fra referansebygget. Byggevarer som blir brukt eller gjenbrukt skal tilfredstille alle relevante lover og standarder. [22]

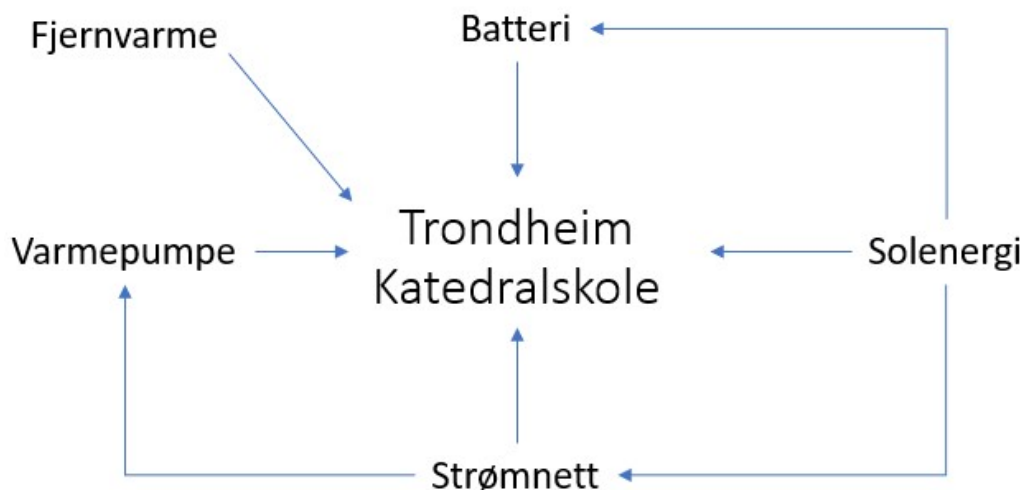
3.1.3 Plusskundeordning

En avgjørende endring i det norske regelverket er blitt sendt til høring i løpet av juli 2022. Det er en ny ordning som foreslår å gjøre det enklere å dele egenprodusert, fornybar strøm for blant annet næringsbygg [56]. Dette er relevant for dette prosjektet. Per dags dato er plusskundeordningen tilrettelagt hovedsakelig eneboliger og ikke bygninger med flere strømbonnter. Plusskundeordning går ut på at de som produserer egen strøm slipper å betale fastledd for innmatting på strømmettet og kan bruke produksjonen til å dekke sine egne behov. Dette er kun tilfellet dersom innmattingen ikke overstiger 100 kW. [57]

Forslaget som var sendt til høring har resultert i at regjeringen vil gjøre det enklere å dele egenprodusert, fornybar kraft med andre strømbonnter på samme eiendom. Det er blitt bestemt at grensen for innmattingen økes til 1000 kW per eiendom. Næringsbygg kommer da til å kunne slippe el-avgiften og nettleie, og vil være omfattet av plusskundeordningen. Nødvendige forskrifter vil bli fastsatt så fort som mulig etter alle avklaringer med EU. Dette gir nettselskapene tid til å omstille seg. [54] En slik regelendring er avgjørende for resultatet av dette prosjektet da det sannsynligvis vil være flere strømmålere fordelt på gamle og nye bygg. Strømdeling på tvers av byggene er dermed ikke mulig, med mindre en finner en måte å koble solcelleanlegget til flere nettstasjoner og/eller strømmålere.

3.2 Energisystemet

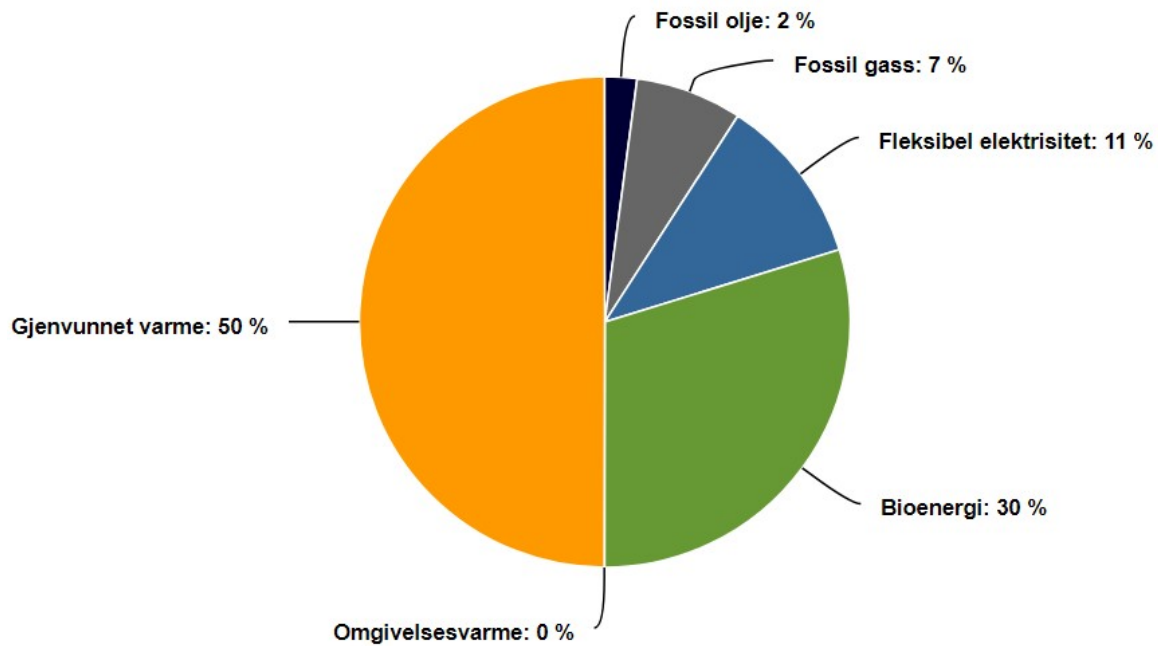
For at skolen skal bli et nullutslippsbygg er det nødvendig at store deler av energibehovet blir dekket av fornybar energi. Energisystemet til Trondheim Katedralskole består i dag av et fjernvarmesystem, men det ønskes også å legge til et solcelleanlegg, batterier og varmepumpe som vist i figur 3.3. Solcelleanlegget vil sende elektrisitet til både skolen, batteriene og strømmettet. Batteriene og strømmettet vil også sende elektrisitet til skolen mens varmepumpe og fjernvarme vil sende varme til skolen. Varmepumpen vil også få tilført strøm til å kunne produsere og sende varmen til skolen.



Figur 3.3: *Energisystemet til Trondheim Katedralskole*

Et fjernvarmesystem er et system som distribuerer varmt vann fra energisentraler til brukere for å produsere varme. Trondheim Katedralskole er allerede tilknyttet fjernvarme fra Statkraft Varme. Dette fjernvarmenettet kommer fra forbrenningsanlegget på Heimdal som hovedsaklig benytter restavfall til å varme opp fjernvarmevannet. Fjernvarmenettet inneholder $46.3 \text{ g CO}_2 \text{ ekv/kWh}$ og har en fornybarandel på 88.7 %. Figur 3.4 viser fordelingen over energikildene i Statkraft Varme sitt fjernvarmenett. Fjernvarmenettet har blant annet fossil olje og gass som drar ned fornybarandelen. [58]

En utfordring med fjernvarmenettet i Trondheim slik det er nå er at det er distribuert ved rundt 100°C og dagens bygg har ikke behov for så høy varme. Et fjernvarmesystem med lavere distribusjonstemperaturer kunne vært mer effektivt og gi mindre varmetap. Lavere temperaturer på fjernvarmenettet reduserer behov for spisslastkilder, ofte basert på fossile brensler, noe som ville bidratt positivt til fornybarandelen i systemet. [59, 60]



Figur 3.4: Energikilder i Statkraft Varme 2021. Bildet er hentet fra Statkrafts nettside [61]

Ettersom fjernvarme ikke dekker hele oppvarmingsbehovet alene, skal det også brukes en varmepumpe. En varmepumpe er en maskin som benyttes til å transportere varme fra to områder med ulike temperaturnivå. Denne løsningen trenger tilførsel av elektrisitet, men vil til gjengjeld produsere mer energi enn det som ble brukt. Skolen skal ta i bruk luft-til-vann-varmepumper. En slik løsning vil utnytte varme fra luft til å varme opp vann til radiatorer, vannbåren gulvvarme eller til å forvarme tappevann. [62, 63]

Det skal i tillegg bli dimensjonert solcellepaneler på skolen som skal konvertere solenergi til elektrisitet. Bruk av solenergi skal minimum bidra med 40 % av den samlede lokale energiproduksjonen målt i produsert kWh (El + termisk). Beregninger viser at det vil være behov for å produsere $105600 kWh/år$ ved bruk av solceller for å kompensere for byggets CO_2 -utslipp knyttet til byggets energiforbruk og møte ZEB-O krav. I følge kravspesifikasjonene fra RIE (Rådgivende Ingeniør Elektro) fra Trøndelag Fylkeskommune skal solcellepanelene være i samme fabrikat og modell, og ha lik nominell effekt. [22, 64]

Solcellene vil kobles mot batterier for å lagre overskuddsenergi. På sommerhalvåret skal batteriene døgnutjevne ved å lagre solenergi mens på vinterhalvåret skal de jevne ut effekttopper i høylasttimer og lagre energi i lavlasttimer. Batterianlegget skal dimensjoneres for minimum å kunne dekke 30 % av effektbehovet i driftstime med høyeste effektlast og minimum levere $75 kW$ effekt, med en batterikapasitet på $350 kWh$. [22]

Tabell 3.1 representerer dekningsgrad for energiforsyning lagt til grunn for prosjektets beregninger. Varmepumpene skal dekke store deler av behovet for romoppvarming og ventilasjonsvarme. Oppvarming av tappevann skal for det meste bli dekket av fjernvarme og litt av elektrisitet fra solceller og strømnnett. Elektrisitet skal også dekke resten av behovet for ventilasjonskjøling, lokalkjøling og elektrisitetets spesifikt energibehov. Videre viser tabell 3.2 hvor mye energi som blir levert av hvert system.

Tabell 3.1: *Energiforsyning i prosjektet [23]*

Bygningsdel	Elektrisitet	Fjernvarme	Varmepumpe (luft-vann)
Romoppvarming	10 %	0 %	90 %
Oppvarming tappevann	30 %	70 %	0 %
Varmebatterier ventilasjon	10 %	0 %	90 %
Kjølebatteri ventilasjon	100 %	0 %	0 %
Lokalkjøling	100 %	0 %	0 %
El. spesifikt energibehov	100 %	0 %	0 %

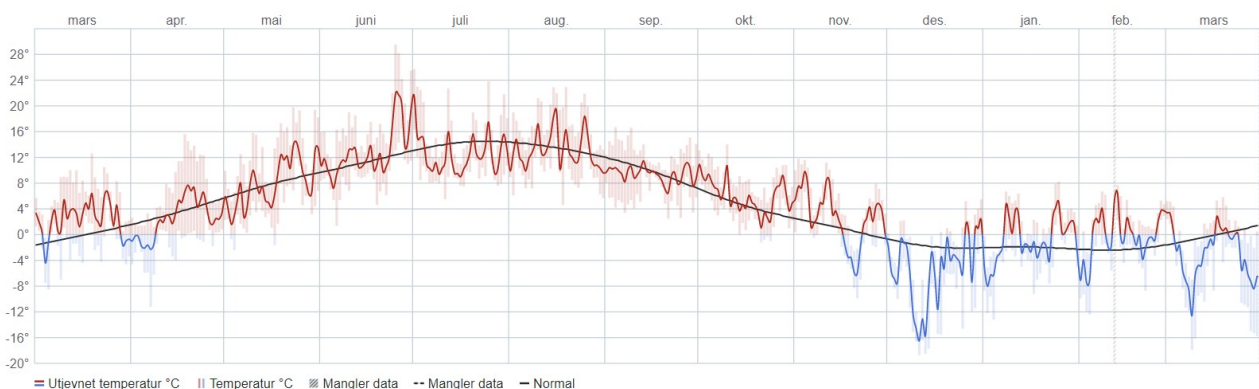
Tabell 3.2: *Levert energi av hvert system [23]*

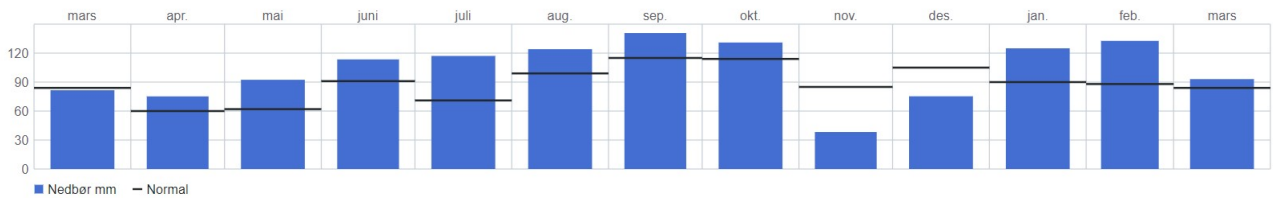
System	Levert energi [kWh/år]
Varmepumpe	15124
Fjernvarme	18690
Elektrisitet	67028
Totalt	104211

3.3 Klima i Trondheim

Trondheim er valgt som klimasted ved beregninger i dette prosjektet. Dette er likevel overstyrt til normalisert klimaforhold, slik at evaluering mot forskriftskrav i TEK17 blir enklere. Dimensjonerende tredøgns middeltemperatur i Trondheim er på $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ i henhold til SINTEFs ”*Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring*”, BKS 451.021 [53]. Årsmiddeltemperaturen beregnet i 2015 er gitt til å være $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ [65]. I tillegg er det gitt at normalnedbøren i Trondheim er på 850 mm/år og slagregnmengde er på 368 mm/år med hovedretning 250 ° . For Trondheim Katedralskole betyr dette at det er fasadene rettet mot sør-vest som vil bli mest utsatt for slagregnet. [53]

Figur 3.5 viser temperaturdata for Trondheim i løpet av tidsperioden mars 2022 - mars 2023. På lik linje viser figur 3.6 nedbørdata for Trondheim i samme periode. I løpet av denne perioden har temperaturen variert i mellom $-18.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det har i løpet av det våteste døgnet kommet 38.7 mm med regn. Trondheim har totalt hatt 187 nedbørdøgn i løpet av denne tiden. Dataen er hentet fra Sverresborg målestasjon. Denne ble opprettet i 2007 og ligger i Trondheim kommune på en høyde på 156 moh [66].

**Figur 3.5:** *Temperaturgraf for Trondheim for perioden mars 2022 - mars 2023. Bildet er hentet fra yr.no [66]*



Figur 3.6: Nedbørgraf for Trondheim for perioden mars 2022 - mars 2023. Bildet er hentet fra yr.no [66]

3.4 Lignende prosjekter

Fit for 55-pakken har et mål om å lovfeste at alle offentlige nybygg skal være nullutslippsbygg innen 2027 og alle andre nybygg skal være nullutslippsbygg innen 2030 [46]. Det er derfor bakgrunnen for at det nå satses mer på ZEB. Grunnet dette finnes det også flere pågående og ferdige prosjekter som ligner på Trondheim Katedralskole. Dette kapitlet skal ta for seg kun noen av de som var av relevans for det endelige prosjektet. Prosjekter som det blir snakk om er Heimdal-, Horten- og Ishavsbyen videregående skoler. Andre prosjekter som også kunne vært av relevans er blant annet Cissi Klein videregående skole, Tiller videregående skole, Tveiterås skole, Campus Evenstad og Campus Grimstad.

Heimdal videregående skole

Heimdal videregående skole er plassert i Trøndelag fylke, utenfor Trondheim sentrum, og ble først tatt i bruk ved skolestart i august 2018, bilde av skolen slik den ser ut nå er mulig å se i figur 3.7. Denne skolen har oppnådd sertifisering ZEB-O og passivhus i følge standarden NS 3701:2012. Dette tilsvarer krav som nå stilles til Trondheim Katedralskole. Hele Heimdal vgs er nybygd da reovering ble ansett for krevende på grunn av kravene som ble stilt. Heimdal vgs har et totalt areal på 33600 m². Dette tilsvarer omtrent 2.5 ganger størrelsen til Trondheim Katedralskole. [67]



Figur 3.7: Nye Heimdal vgs har oppnådd nivået ZEB-O. Bildet er hentet fra saupstad.no [68]

Denne skolen har tidligere blitt omtalt som Norges mest miljøvennlige skole [69]. Bygningene i den nye Heimdal vgs er konstruert på en måte som gjør energibruken mer effektivt, ved at minimale mengder med varme går tapt gjennom bygningskroppen. I tillegg er det installert en meget effektiv VVS (varme, ventilasjon og sanitærteknikk) system som sørger for at energien til oppvarming og kjøling av bygget brukes smart. Heimdal videregående skole har også installert en jordvarmepumpe, solcellepaneller og, ulikt mange andre energieffektive skoler, bruker den i tillegg biomasse til oppvarming. [67]

Horten videregående skole

Horten videregående skole ble ferdigstilt og tatt i bruk i 2019. Skolen ligger i Vestfold og Telemark fylke på utsiden av kystbyen Horten og består av to bygg. Horten vgs er mulig å se i figur 3.8. Bygningene oppfyller krav til passivhus i følge standarden NS 3701:2012 og er et plusshus. I tillegg har byggene fått en sertifisering BREEAM-NOR Outstanding. I følge Grønn Byggallianse er det kun 14 bygg i hele Norge som har sertifiseringsnivå ”Outstanding” i BREEAM-NOR, der den nye Horten videregående skole er et av dem. For å få en BREEAM-NOR sertifisering med nivå ”Outstanding”, må en sørge for å få mange miljøpoeng. Man får poeng for plassering, materialbruk, tilgjengelighet og mye mer. For å få bygget sertifisert til det ønskende nivået, ble det blant annet sørget for en utslippsfri byggeplass og en rekke andre klimavennlige tiltak. [70, 71] Skolen har et totalareal på 18000 m^2 . [67]



Figur 3.8: Nye Horten vgs har oppnådd BREEAM-NOR sertifisering ”Outstanding”. Bildet er hente fra LINK arkitektur [72]

Horten videregående skole har på lik linje med Heimdal vgs og ikke minst Trondheim Katedralskole en utmerket bygningskropp som sørger for at all varmen skal forbli i bygget og dermed at bygget blir mer energieffektivt. Det er også et meget effektivt VVS system som er montert på skolen som også bidrar med energieffektivitet. Ikke minst bruker byggene en CO_2 varmepumpe, jordvarmepumpe og solcellepaneller på hele 3500 m^2 , som til sammen sørger for tilføring av ren energi og varme til skolen. [67, 71]

Ishavsbyen videregående skole

Ishavsbyen videregående skole er plassert i utkanten av byen Tromsø i Troms og Finnmark fylke. Skolen skal renoveres og det skal bygges nybygg, på samme måte som på Trondheim Katedralskole. Per nå er skolen i detaljert design fase, akkurat som Katta. Illustrasjonsbildet 3.9 viser 3D skissen av den nye Ishavsbyen vgs. Skolens nybygg skal ha et totalareal på 8100 m^2 og planlegger å oppnå nZEB (nearly Zero Emission Building). For å få til dette er det planlagt en utslippsfri byggeplass og høy grad av gjenbruk av materialer og inventar. Det er i tillegg cirka 5300 m^2 med eldre bygg som skal renoveres. Disse tas likevel ikke med i beregningen av nZEB-krav, på samme måte som det i Trondheim Katedralskole ikke tas hensyn til Aula, Moe byggene og Harsdorff. [67, 73]



Figur 3.9: *Ishavsbyen vgs er i detaljert design fase. Skolen skal oppnå nZEB-krav. Bildet er hentet fra Troms og Finnmark fylkeskommune/Peab Bjørn Bygg [73]*

Prosjektet består av flere bygg med energieffektive bygningskropper og effektive VVS system. På lik linje som Katedralskolen skal skolen bli forsynt med varme fra et fjernvarmeanlegg. I tillegg skal det tas i bruk en jordvarmepumpe og solcellepaneler. Prosjektet omtales av fylkeskommunen som et av de største byggeprosjektene i området på 20 år. Forventet ferdigstilling av skolen er i 2024. [67, 73]

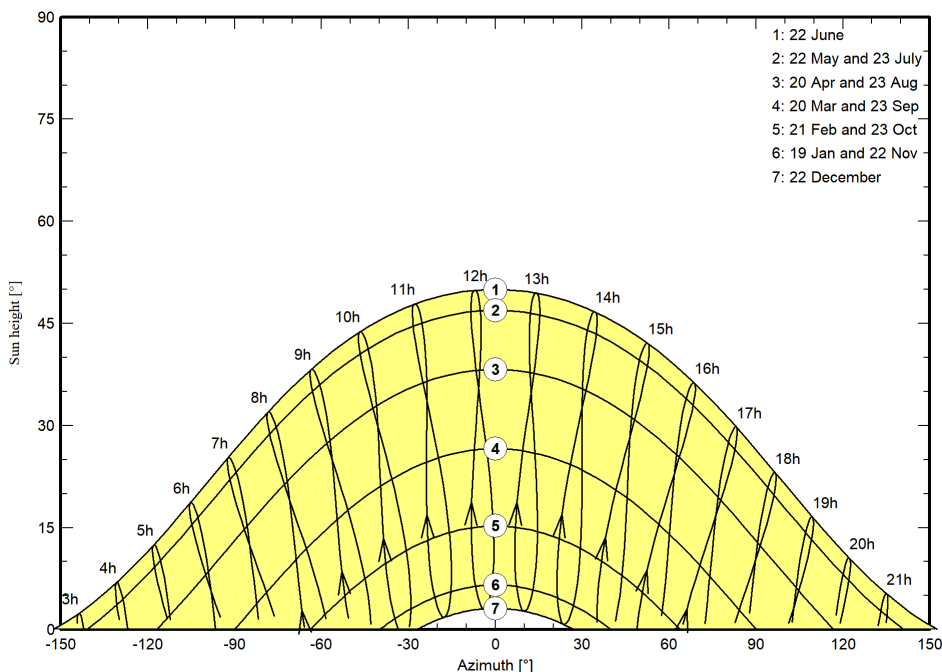
4 Solceller

I denne bacheloroppgaven skal solceller benyttes for å produsere elektrisitet slik at Trondheim Katedralskole oppnår ZEB-O krav. Solcellene skal bli satt sammen i et anlegg hvor de henter energi fra solen og omgjør dette til elektrisitet som kan selges til strømmnett, brukes eller lagres i batterier. Når solcellene skal kobles på bygget kan det integreres paneler som en del av eller utpå bygningskroppen. Solcellene på skolen skal settes på taket og fasaden av et av nybyggene skal vurderes. Det er flere ulike paneler som er aktuelle i dette prosjektet og ettersom at det er et krav om ZEB-O skal de mest miljøvennlige alternativene vurderes.

4.1 Solenergi

Solenergi er lysstråler/varmestråler fra sola. Mengde solenergi som treffer jorda hvert år er 15000 ganger mer enn hele befolkningens årlige energiforbruk. Avhengig av hvor en er på jorda gir solen en energimengde mellom 700 til 2200 kWh/m^2 per år. I Trondheim ligger solinnstrålingen på rundt 800 kWh/m^2 . [74, 75]

Sollyset vil stråle inn ved ulike vinkler på forskjellige tider av døgnet og året. Figur 4.1 viser hvordan sollyset treffer Trondheim Katedralskole på ulike tider av døgnet fordelt på forskjellige deler av året. På x-aksen vises azimuth vinkelen, altså vinkelen på en horisontal flate. Dette er vinkelen som skiller mellom retninger som nord, øst, vest og sør. På y-aksen vises solens høyde, altså hvor solen står på himmelen, i grader. Denne vinkelen kalles en altitude og er vinkelen mellom solstrålen og horisontal flate. Når sollyset skal bli brukt av en plate som for eksempel solceller, er det vanlig å plassere platen i azimuth og tilt. Tilt vinkelen beskriver hvor vertikalt platen står i forhold til den horisontale flaten. [76]



Figur 4.1: Vinkler for Trondheim Katedralskole hentet fra PVSyst

Den enkleste metoden å utnytte solenergi på er passiv solvarme, altså romoppvarming ved at solen skinner inn gjennom vinduet. Passiv solvarme kan tilsvare 10 % til 15 % av oppvarmingsbehovet til

bygningen [74]. Aktiv solvarme er motstykket til passiv solvarme. Her kreves et anlegg som fanger opp varmen fra solen og transporterer den videre til et egnet sted slik at den kan brukes til oppvarming av vann eller bygningsmasse. Ved aktiv solvarme kreves altså en solfanger og disse leverer typisk 300-500 kWh/år varme per m^2 solfangerareal, avhengig av type solfanger og systemløsning. [74, 77] I dette prosjektet skal det ikke fokuseres på solfangere men på solceller.

4.2 Solcelleteknologi

Solceller omgjør sollys til elektrisitet ved hjelp av den fotovoltaiske effekt. Dette kan beskrives ved å gå i dybden på solcellenes oppbygging. Solcellene har et tynt og mørkt belegg på toppen som vil absorbere mest mulig sollys. Under dette belegget ligger det en halvleder. Halvledere er stoffer som ikke er gode elektriske ledere i ren form. På halvlederen til solcellene kan egenskapene og ledningsevnen endres ved å tilsette små mengder av andre stoffer og dette kalles doping. [78]

N-doping står for negativ doping og oppstår når halvlederen blir dopet med et stoff som gir overskudd av elektroner i henhold til oktettregelen. Oktettregelen sier at atomer trenger 8 elektroner i sitt ytterste skall for å ha en stabil fordeling. Et atom vil altså ta opp, avgi eller dele elektroner med andre atomer for å oppnå oktettregelen. [12] I motsetning til n-doping finnes p-doping, positiv doping, hvor halvlederen blir tilsatt et stoff som gir underskudd av elektroner. [78]

Ladningsforskjellene vil gjøre at elektronene vil flytte seg fra p-siden til n-siden av halvlederen. Etter at elektronene har forflyttet seg og oktettregelen er oppnådd på begge sidene av halvlederen, vil det være likevekt i systemet. Balansen vil forandre seg når solcellene treffes av sollys. Når sollyset treffer panelene vil energien fra et foton i sollyset kunne slå løs et elektron. Videre vil ubalansen i systemet gjøre at det utveksles elektroner fra n-siden og p-siden. Når elektronene er i bevegelse vil det dannes strøm. [78]

Solceller er ofte laget av halvlederen silisium og dopes vanligvis med bor eller fosfor. Den mest utbredte typen solceller er waferbaserte solceller laget av silisium. Det kan deles inn i tre typer solcelleteknologier, altså monokrystallinske, multikrystallinske og tynnfilm. Monokrystallinske solceller er bygget opp av et silisiumkrystall og belegget på solcellene er vanligvis svart slik at all lys absorberes i solcellene. Effekten til monokrystallinske solceller ligger oftest på rundt 18 % – 23 %. Multikrystallinske solceller består av flere krystaller og har ofte et gjenkjennelig fargespill i overflaten. Effekten til disse modulene ligger som regel på 15 % – 17 %. [10]

Tynnfilm solceller er meget tynne deponerte lag av solceller på et substrat. Disse panelene har en ensartet farge og er fleksible, noe som gjør at de kan plasseres steder hvor monokrystallinske og multikrystallinske paneler ikke kan. Effektiviteten til modulene ligger på rundt 10 % – 17 %. De vanligste typene tynnfilmssolceller er Copper Indium Gallium Selenid (CIGS), Cadmium Tellurid (CdTe) og ulike silisium-varianter med amorft silisium. [10]

4.3 Prosjektering av solcelleanlegg på bygg

Når solceller skal prosjekteres på et bygg kan det vurderes ulike metoder for å integrere solcellepanelene på bygget. BAPV altså bygningsanvendte solceller, er den mest utbredte måten for å montere solceller på bygg. Her blir solcellene festet på bygget etter at bygningskonstruksjonen er komplett. BIPV altså bygningsintegrerte solceller, er en løsning hvor solcelleanlegget erstatter deler av bygningskroppen til bygget. De vil altså produsere elektrisk energi samtidig som de erstatter et bygningsmateriale eller en bygningskomponent. Eksempler på bygningsintegrerte solceller kan være ved integrasjon av solceller i vinduer, tak, rekkverk og integrert på fasaden til bygget. [79] På Trondheim Katedralskole er det

planlagt å implementere bygningsanvendte solceller på taket til to av nybyggene. Videre vurderes det å montere solcellepaneler på deler av sør- og østsiden til fasadene til Midtbygget.

Tak er den mest populære plasseringen av solceller og dette er grunnet at det ofte gir optimal vinkling for høyest årlig produksjon fra solcellene. I tillegg er det som regel mest areal å ta fra taket som kan bli brukt til solcellemontering. På flate tak som på Trondheim Katedralskole vil ofte solcellepanelene installeres i øst/vest-orientering med en helning på 10° . Denne helningen er optimal på flate tak ettersom at det utnytter takarealet mest og unngår at solcellepanelene kaster skygge på hverandre. Videre kan det være en fordel å holde solcelleanlegget minst 3 m fra takkanten. Dette er grunnet at arbeid nærmere enn 2 m fra takkanten krever sikringer, noe som øker installasjonskostnaden. [80] Dersom det velges et alternativ med sikringer kan man benytte forskrift 712C.2.3. Denne metoden ble anbefalt av energirådgiver i HENT, Anders Sørgård, se vedlegg C. Her vil solcellemodulene bli montert med 1 m unna minst 2 ytterkanter

Det er to ulike festemetoder for solcelleanlegg på tak, mekanisk innfestning og ikke-mekanisk innfestning med ballast. Rambøll har anbefalt at det, i dette prosjektet, vil anvendes en ikke-mekanisk innfestning med ballast. Solcellene skal altså ikke festes til et bæresystem, det skal istedet settes en last på solcellefoten slik at den står stille på taket. Ved montering av solceller på tak må de monteres slik at det ikke går på bekostning av fuktsikkerhet, og takdekkingen må ikke skades under monteringen. Vekten av solceller og ballasten må ikke gi skade på takdekking eller skape deformasjoner i isolasjon eller membransjikt som hindrer vandrennering. [53]

Fasader gir optimale innstrålingsvinkler når solcellene på taket produserer minst, altså på vinterhalvåret, når solen står lavest. Likevel vil den totale årsproduksjonen fra solcellene bli noe lavere enn på tak. En fordel med at solceller på fasade har høyere produksjon på vinteren, er at det er da strømprisene er høyest. Dette vil være økonomisk gunstig ettersom at man sparer penger når prisene er høyest. Solceller på fasaden vil være mer synlig enn solceller på tak og dette kan bidra til å forsterke byggets miljøprofil. Solceller på fasade blir ofte installert når kunden har ambisiøse energimål og det ikke er mulig å komme i mål med takmonterte solcelleanlegg alene. [80]

I monteringen av solceller på tak eller fasade kan man benytte både BIPV og BAPV. Når man skal vurdere bygningsintegrerte solceller er det viktig å vurdere både muligheter og utfordringer. BIPV erstatter elementer av bygningskroppen og kan derfor gi besparelser i materialforbruk, arbeidskraft og strømkostnader. Videre kan bygningsintegrerte solceller gi bygget et helt spesielt uttrykk. Potensielt kan kostnader bli reduserte grunnet synergier med byggets funksjoner, komponenter og installasjonsprosess. Bygningsintegrerte solceller må tilfredstille de samme bygningstekniske kravene og ytelsene som elementene de erstatter. Dette stiller spesielle krav til regntetthet og lufting av paneler for å gi god fuktsikkerhet og produksjonseffektivitet fra anlegget. Installasjonsprosessen av bygningsintegrerte solceller kan være komplisert. I tillegg kan det også oppstå utfordringer i driftsfasen, som behov for vedlikehold med nødvendige demonteringer og utledning av defekte paneler. [81]

Både BIPV og BAPV må følge de byggtekniske kravene gitt i byggteknisk forskrift for konstruksjonssikkerhet, fuktsikkerhet, sikkerhet ved brann og helse og miljø. Innfestningen skal oppfylle krav til konstruksjonssikkerhet ved å hindre at solcelleanlegget løsner seg. Installasjoner av solcelleanlegg vil gi økt last på bygninger og det er derfor nødvendig med beregninger for å ivareta konstruksjon. Solcelleanleggets belastning kan forandres med vindkrefter og snølast og dette må bli tatt hensyn til i beregninger. Når det kommer til fuktsikkerhet må det være en varig tetthet i forbindelse med innfestning av solcellepanelene. Det er risiko for skade på bygget ved montering av panelene. Det kan også oppstå risiko for at utettheter, ved gjennomføring av arbeidet, fører til skade senere. [82]

4.4 Miljøperspektiv og solcellemoduler

Under Trondheim Katedralskole prosjektet er det ønskelig å ha minst mulig utslipp for å oppnå ZEB-krav og derfor er det viktig å ta hensyn til hvilke typer solcellepanel som velges under prosjektet. Solceller slipper ikke ut utslipp i løpet av driftsårene men de vil ha utslipp under produksjon. Utslipet kan eksempelvis komme fra transport og utvinning av materialer. Ofte vil utslippet av solcellepanelene kompenseres for ved at energien fra panelene erstatter eller reduserer energi fra mindre miljøvennlige kilder. [83]

En miljødeklarasjon som EPD (Environmental Product Declaration) er et kortfattet dokument som oppsummerer miljøprofilen til en komponent, produkt eller en tjeneste. En EPD lages på grunnlag av livsløpsanalyse og sikrer at miljøinformasjonen innen samme produktkategori kan sammenlignes for forskjellige produkter. [84] I denne oppgaven er det valgt å se på de ulike solcellepanelene som finnes i EPD-Norge, slik at man kan sammenligne disse panelene med hverandre. Solcellene kan bli sammenlignet på tvers av systemgrensene som er vist i figur 4.2.

Product stage			Assembly stage		Use stage							End of life stage				Benefits & loads beyond system boundary
Raw materials	Transport	Manufacturing	Transport	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery-Recycling-potential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figur 4.2: Systemgrenser i EPD Norge. Bildet er hentet fra EPD-en til N-Peak 2 [85]

Solcellemodulene med EPD:

N-Peak 2: Et monokrystallinsk solcellepanel på 375 Wp . Panelet har et areal på $1.825 m^2$, noe som gir $205.5 Wp/m^2$. Produsenten Rec Solar EMEA GmbH er fra Singapore og henter polysilisium fra Malaysia, ingot og wafer fra Kina. Solcellene er produsert hos produsenten i Singapore. [85]

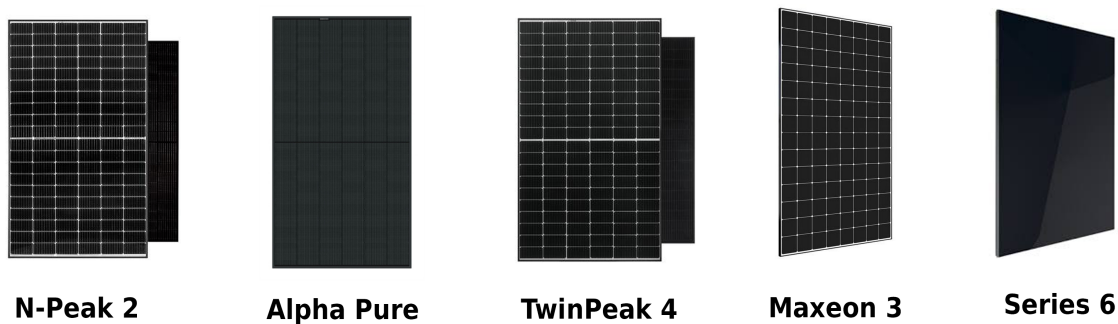
Alpha Pure: Et monokrystallinsk solcellepanel på 410 Wp . Panelet har et areal på $1.85 m^2$, noe som gir $221.6 Wp/m^2$. Produsenten er Rec Solar EMEA GmbH fra Singapore og henter polysilisium fra Tyskland, ingot og wafer fra Kina. Solcellene er produsert hos produsenten i Singapore. [86]

TwinPeak 4 Et monokrystallinsk solcellepanel på 375 Wp . Panelet har et areal på $1.825 m^2$, noe som gir $205.5 Wp/m^2$. Produsenten er Rec Solar EMEA GmbH fra Singapore og henter polysilisium fra Norge, ingot og wafer fra Kina. Solcellene er produsert hos produsenten i Singapore. [87]

Maxeon 3 Et monokrystallinsk solcellepanel på 400 Wp . Panelet har et areal på $1.775 m^2$, noe som gir $226 Wp/m^2$. Produsenten er SunPower fra Mexico og henter 10 % av silisium fra Norge og 90 % fra USA og wafer fra Norge. Solcellene er produsert i Filippinene og sendt videre til Mexico for å sette sammen modulene. [88]

Series 6 Et tynnfilm solcellepanel (CdTe) på 420 – 450 Wp . Panelet har et areal på $2.47 m^2$, noe som gir $170-182.2 Wp/m^2$. Produsenten First Solar er fra USA og produksjonen er 22.8 % fra Malaysia, 29.9 % fra USA og 47.2 % fra Vietnam. [89]

Figur 4.3 viser solcellemodulene som er beskrevet over. Her ser man at de monokrystallinske solcellene har samme mønster på seg, mens modulen Alpha Pure skiller seg litt ut. Tynnfilm solcellepanelet, Series 6, er ensfarget og helt svart.



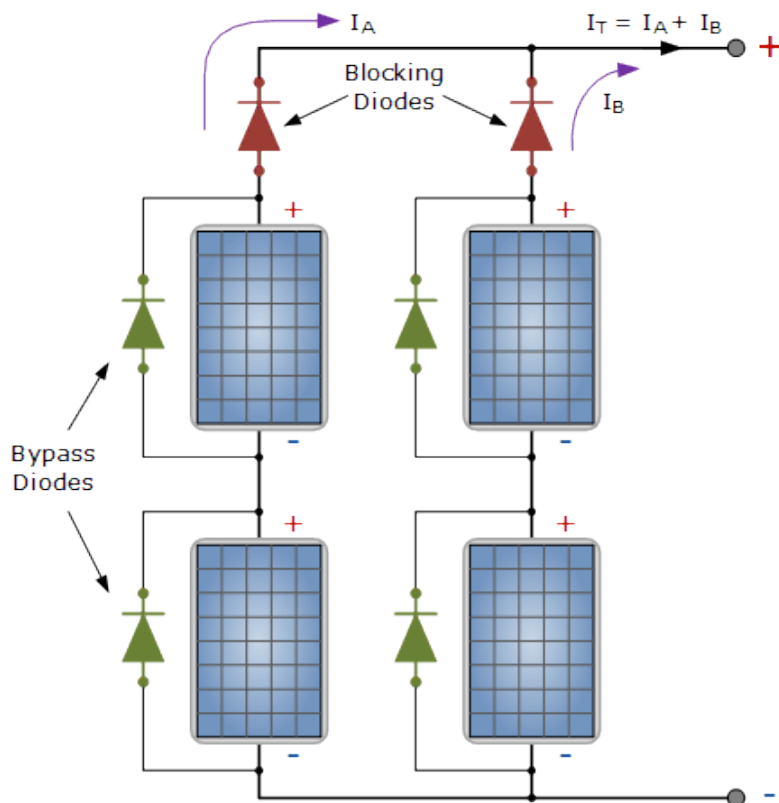
Figur 4.3: Solcellemodulene som har EPD. Bildet er satt sammen av bilder fra kildene i modullisten ovenfor

4.5 Tilkobling til bygg og strømmnett

Flere solceller er satt sammen for å utgjøre et solcellepanel og flere solcellepanel som er satt sammen utgjør et solcelleanlegg [90]. Når panelene kobles sammen kan de entes kobles i en seriekobling eller en parallellkobling. I en seriekobling vil den positive terminalen til et panel være tilkoblet den negative terminalen til neste panel. Spenningen i panelene i serien summeres mens strømmen forblir det samme. Dersom det kommer skygge på et av panelene vil det senke den totale effekten av solcelleanlegget. Her er altså hvert panel avhengig av hverandre.

I en parallellkobling vil alle de positive terminalene være koblet sammen og alle de negative terminalene være koblet sammen. Strømmen i panelene i parallellkoblingen summeres mens spenning forblir det samme. I motsetning til i en seriekobling er ikke de parallellkoblede solcellene avhengige av hverandre. Hvis skygge kommer på et av panelene i seriekoblingen vil de resterende panelene fortsatt generere strøm. [91]

Det er vanlig å bruke to typer dioder under tilkobling med solcellepanel. Det er bypass og blocking dioder. En bypass diode er plassert i parallell med solcellepanelet slik at det fremdeles går strøm ved dersom en av panelene er skyggelagt. Blocking diode er plassert i serie med solcellepanelet for å forhindre at strøm strømmer tilbake til panelet. Figur 4.4 viser et eksempel på hvordan dioder blir plassert i en krets sammen med solcellepanel. Bypass diodene kan bli plassert med hvert solcellepanel og blocking diodene blir ofte plassert mellom hver parallellkoblede gren. Blocking dioden vil da hindre at strømmen fra parallellkoblede grener, hvor noen panel er skyggelagt, går inn i andre grener. [92]



Figur 4.4: Dioder tilkoblet solcellepaneler. Bildet er hentet fra *electronics-tutorials.ws* [92]

Videre kobles panelene på bygget enten off-grid, on-grid eller hybrid. Et on-grid solcelleanlegg vil være koblet til et nett. Her kan kunden bruke strømmen fra solcellene, bruke strøm fra nettet og/eller selge strøm fra solcellene til nettet. I motsetning er et off-grid solcelleanlegg ikke koblet til nettet. Kunden bruker istedet all egenprodusert strøm fra solcellene. Overproduksjonen fra anlegget lagres da i batterier. [7] Trondheim Katedralskole vil bruke et hybrid system. Skolen vil altså være koblet til strømmettet, og da kunne kjøpe og selge elektrisitet. Samt vil den bruke egenprodusert strøm og lagre overskuddsproduksjonen i batterier.

Strømmen fra solcellene kommer i likestrøm (DC) og det vil være en inverter som omformer strømmen til vekselstrøm (AC) slik at det kan benyttes i bygget og nettet. I DC holdes elektrisiteten i en retning ved at det er konstant spenning mens i AC flyter elektrisiteten i begge retninger ved at spenningen endres fra positiv til negativ. Konverteringen mellom DC og AC strøm skjer ved at inverteren endrer retningen til DC strømmen raskt frem og tilbake slik at strømmen blir omgjort til AC. [93]

Det finnes ulike typer invertere på markedet som blant annet strenginverter, mikroinverter og sentral inverter. Strenginverter er den mest vanlige løsningen til solcelleanlegg. Her er inverteren koblet i serie/streng med solcellepanelene. Ved å være koblet i serie vil den totale energien være basert på panelet med lavest ytelse. Dermed blir det viktig at alle panelene har samme nominell effekt og yter på likt nivå. En sentral omformer brukes ofte ved store solcelleanlegg og er ofte dyrere enn strenginvertere men har større effekt. Mikroinvertere er koblet til hvert enkelt solcellepanel og er derfor dyrere enn andre inverter løsninger. Likevel er også mikroinverter den mest effektive løsningen. [94, 95]

Invertere kommer i ulike størrelser og det er flere faktorer å ta hensyn til når inverteren blir dimensjonert. Ofte blir invertere underdimensjonert i forhold til hvor mye topp effekten til solcelleanlegget er. Dette skyldes at de fleste anlegg ikke når sin maksimale effekt. Hvor mye man underdimensjonerer inverteren avhenger av klima. I norsk klima er det anbefalt at inverterene er dimensjonert 15-20 % under

toppeffekten til solcelleanlegget. Hvis inverteren er sterkt underdimensjonert kan dette ha en negativ effekt på anlegget ettersom at det ikke kan behandle deler av strømmen når det er høy innstråling. Det er også viktig at likespenningen fra solcellene ikke overskrider den tillatte inngangsspenningen til inverteren ettersom at det kan føre til skade på denne. Overdimensjonerte invertere har ekstra kapasitet i forhold til solcelleanlegges totale effekt. Dette kan føre til unødvendige ekstra kostnader. Men dersom det er et ønske å oppgradere solcellesystemet i fremtiden kan det være optimalt å overdimensjonere inverteren. [94, 96]

Kraften fra solceller går først inn i inverteren før den blir sendt videre til bygg, batteri eller strømmnett. En nettstasjon er siste ledd i overføringsnett for elektrisk kraft. Denne transformerer høyspent distribusjonsnett med spenningsnivå $11 - 22 \text{ kV}$ til lavspent distribusjonsnett med 230 V eller 400 V . På et IT nett er faselederne og nøytralpunkt isolert fra jord med et overspenningsvern. Spenning på dette nettet ligger på 230 V . Høy spenning kortslutter og leder til jord. Et TN nett har også en nøytralleder, en spenning på 400 V og mindre tap i linjene. [97, 98]

Som tidligere nevnt er det utfordringer ved deling av strøm mellom bygninger med ulike strømmålere. Da kan det komme flere avgifter av å selge strømmen til nettet for så å kjøpe opp strømmen igjen. Solcelleanlegget på Trondheim Katedralskole skal være tilkoblet den allerede eksisterende 230 V nettstasjonen. Det blir økt behov for spenning når solcelleanlegget blir tatt i bruk. Av den grunn vil det også bli plassert en ny 400 V nettstasjon ved skolen. Det er ikke nevnt hvor mange strømmålere som vil være koblet til disse nettstasjonene og her kan det være en utfordring med strømdeling mellom strømmålerne. Ettersom at det er to nettstasjoner må det være minst to strømmålere.

5 Energilagring

I dette prosjektet ønskes det en sikker og stabil strømforsyning. Energiproduksjon fra solceller påvirkes av været og det er derfor ikke gitt at solcellene vil produsere energi etter behov. Batterier kan lagre energien som produseres når produksjonen er større enn behovet og tilføre energi når produksjonen er mindre enn behovet. De kan både sørge for jevn tilførsel av nødvendig elektrisitet samt fungere som en reserveløsning ved strømbrudd.

Om all den produserte energien ble sendt direkte ut på strømmettet, ville det ha ført til at strømmettet ble overbelastet. Derfor bør solceller i småskala anlegg installeres med et batterianlegg for å kunne lagre eventuell overskuddsenergi. På denne måten kan energien som produseres bli utnyttet til det fulle, uten at det forstyrrer eller svekker stabiliteten i frekvensen på strømmettet. Batterier kan jevne ut lasten slik at man i større grad unngår effekttopper i strømforbruket. [99]

5.1 Elektrisk energilagring

En løsning for energisystemet til Trondheim Katedralskole er at solcelleproduksjonen fra nybyggene lagres i et batterianlegg. Ved å kombinere solceller med energilagring, i form av batterier, er det flere fordeler. Det er nyttig både for forbruker og for kraftnettet. Hvor effektivt batteriet er avgjøres av hvilke type batteri som velges. Markedet består av mange ulike løsninger og det er flere parametere å ta hensyn til.

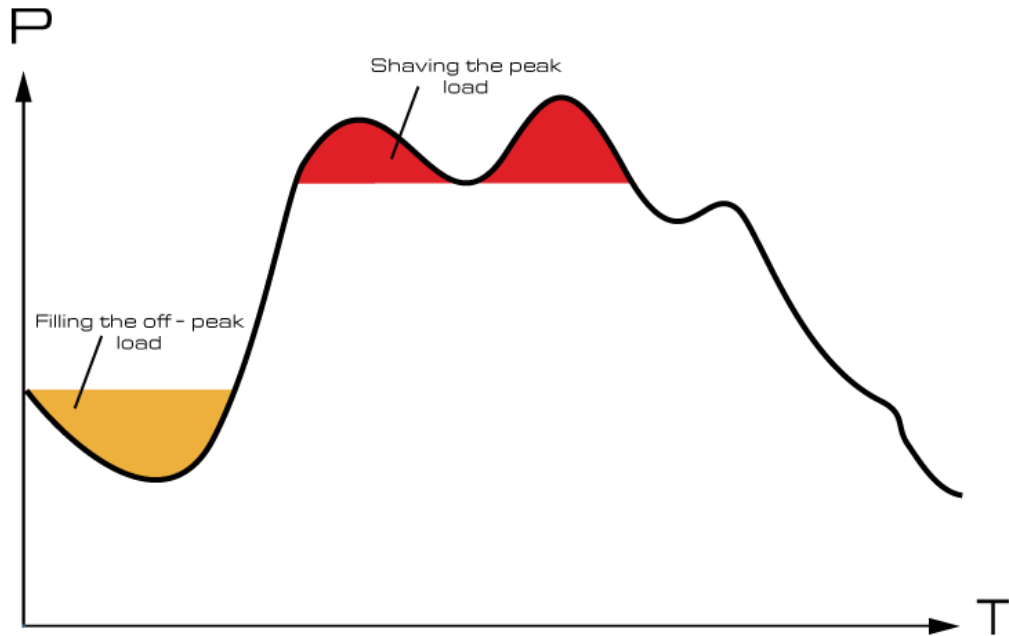
5.1.1 Bruksområde og formål

Batterier har flere bruksområder og formål som blant annet kan være til nytte for distribusjonsnettet fremover. På grunn av endret forbrukermønster og nye effektkrevende laster krever mer av kraftnettet. Smarte strømmålere (AMS) har blitt innfasnet og gitt en bedre innsikt i kraftnettet. Gjennom dette har det blitt oppdaget et behov for reinvesteringer i nettet. [3]

Smarte strømmålere er et verktøy for avregninger og avlesninger av timesverdier for strømforbruk. Ved å implementere dette kan sanntidsdata utnyttets og det bygges opp databaser med nøkkeldata fra distribusjonsnettet. Strømmålere har en utgang som kalles HAN-porten (Home Area Network). Her kan man følge med på forbruk og produksjon. Dette gir muligheten til å redusere forbruket i perioder med høye strømpriser. I tillegg gir strømmåleren beskjed til nettselskapet når det oppstår et strømbrudd, slik at feilen kan finnes og repareres så raskt som mulig. [100]

For å optimalisere energilagringen bør batteriet integreres med byggets SD-anlegg, et sentralt driftsanlegg som styrer byggets forskjellige teknologier på tvers av områder og funksjoner [101]. Data fra batterisystemet blir dermed tilgjengelig for samhandling med resten av bygget. Med riktig oppsett og innstillinger blir batteriet en sentral komponent i styringssystemene. Det vil føre til en god oversikt og kontroll og dermed kan bygget bruke strøm både smart og effektivt. [102]

Batterier kan også bidra til å få en jevnere effektflyt i nettet. Dette fører til at det eksisterende strømmettet blir bedre utnyttet. I tillegg bidrar batterier til leveringskvalitet, forsyningsikkerhet og effektutjevning. Effektutjevning bidrar til et jevnere forbruk og at nettet ikke overbelastes. Det går ut på å flytte på laster og kutte effekttopper. Dette gjøres ved at batteriet lagrer energi når forbruket er lavt og benytter denne energien når forbruket er høyt. Dette er avbildet i figur 5.1. Når den lagrede energien benyttes vil det være et mindre behov for kraft fra nettet og effekttoppene bli mindre. Etterspørselen etter kraft blir jevnere og det blir mindre belastning på strømmettet. [3]



Figur 5.1: Figuren viser at batteriet lades når forbruket er lavt og kutter effekttopper når forbruket er høyt. Bildet er hentet fra AE-solar [103]

5.1.2 Sentrale parametere

Alle batterier har en gitt levetid. Levetiden er temperaturavhengig og det er forskjellig levetid for ulike batteriteknologier. [104] Noen ganger varierer levetiden også for samme teknologi fra forskjellige leverandører grunnet forskjell i regionale standarder [1]. Batterilevetiden kan både måles i år og i sykluser. En syklus defineres som lading eller utlading fra initiell ladetilstand (SoC) og tilbake til samme tilstand. SoC kalles også batterinivået og er forholdet mellom hvor mye energi batteriet har lagret, delt på den maksimale energimengden som kan lagres av batteriet. Altså hvor mange prosent av full ladning som er igjen i batteriet. [104]

Mengden av energi som har blitt tappet fra batteriet, delt på den maksimale energimengden som kan tappes fra systemet kalles Depth of Discharge (DoD) og uttrykkes som en prosentandel av den totale kapasiteten til batteriet [1]. En lavere DoD vil forlenge levetiden betraktelig [105]. Den nedre spenningsgrensen som batteriet lades ut til kalles sluttspenning. Grenseverdien for sluttspenningen er ofte valgt slik at batteriet får brukt den maksimale kapasiteten. Sluttspenningen varierer utifra type batteri og applikasjon der batteriet benyttes. [1] Batterier kan brukes til det har nådd en viss SoH (state-of-health). Dette kalles også batteriets helsetilstand og er den maksimalt tilgjengelige kapasiteten til batteriet i forhold til den maksimalt tilgjengelige kapasiteten til et ferskt batteri. [104]

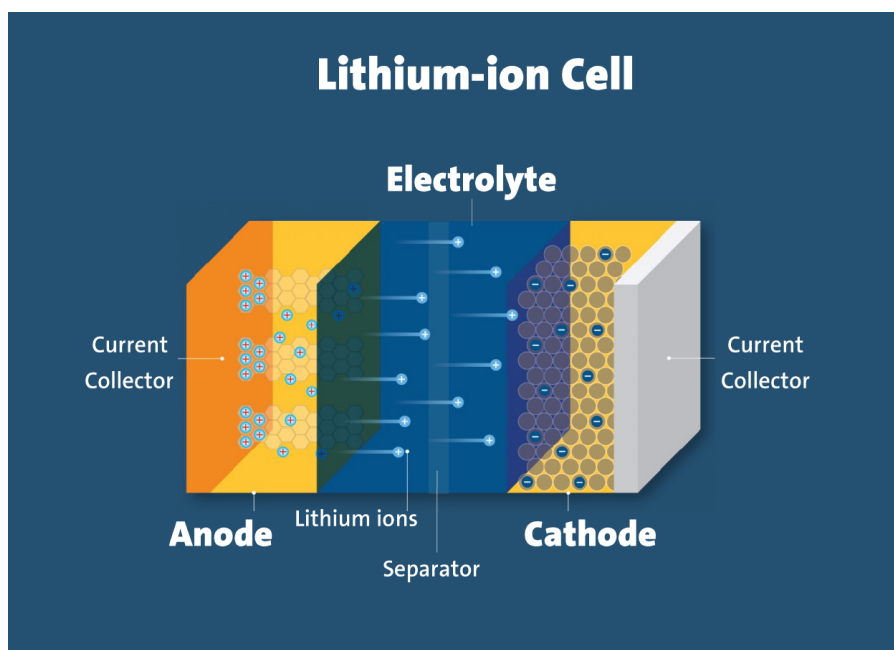
Batterier genererer energi på grunn av en kjemisk reaksjon inne i batteriet. En liten mengde av de kjemiske stoffene inne i batteriet reagerer selv når batteriet hverken lades eller utlades. Disse reaksjonene reduserer kapasiteten og den lagrede ladningen til batteriet. Dette kalles selvutlading. Ved å plassere batteriet i et kaldt og tørt rom kan selvutladingen reduseres. [106] Selvutlading uttrykkes som hvor høy prosent av den lagrede energien som er tapt over en viss periode [104]. Lading- og utladningshastigheten til et batteri beskrives av C-raten. Den defineres som ladningen eller utladningen lik batterikapasiteten delt med en time [1].

Kapasiteten til batteriet er mengden energi batteriet kan levere i en enkelt utladning og måles i kilowatt-timer (kWh). Den nominelle batterikapasiteten er energien som kan avgis fra et batteri i henhold til internasjonale eller regionale standarder, og er ofte angitt ved en gitt temperatur og tid [1]. I løpet av levetiden vil batteriet få en lavere kapasitet. Batteriet bør ikke lades helt ut eller helt opp. Dette øker degraderingen av batteriet. [104] Etter dimensjonert levetid kan batteriet fortsatt benyttes, men kapasiteten vil være betydelig lavere [105]. Kraften til batteriet angir hvor mye strøm batteriet kan levere på et tidspunkt og er målt i kilowatt (kW). Et batteri med høy kapasitet, men lav effekt kan bare levere en liten mengde elektrisitet på en gang, men kan lagre nok energi til å fortsette å gi denne lille mengden strømmen i lange perioder. Et batteri med lav kapasitet, men høy effekt, vil kunne levere en stor mengde elektrisitet på en gang, men bare i en kort periode på grunn av den lave kapasiteten. [107]

Ingen batterier er 100 % effektive. Energi tapes i lagring, ladning og utladning. Virkningsgraden til batteriet er forholdet mellom energien som ble tilført batteriet og hvor mye energi som kan hentes ut fra batteriet etter hele utladning/oppladning syklusen. Dette kalles også round-trip efficiency [13]. Batterier opplever effektivitetstap under konvertering av energi fra lagring til brukbar elektrisitet, typisk rundt 5 % [107].

5.1.3 Forskjellige batterityper

En av de vanligste batteritypene i kombinasjon med solcelleanlegg er litiumionebatterier. Dette er blant annet fordi de har høy energitetthet og krever minimalt vedlikehold. [104] Litiumionebatterier kan variere i oppbygningen, hovedsakelig på grunn av valgt katode materialet. Felles for alle er at de har en positiv og negativ elektrode, også kalt anode og katode, og en elektrolytt. Elektrodene er adskilt av en separator, som vist i figur 5.2. Separatoren danner en fysisk barriere mellom anoden, som kan slippe igjennom litiumioner. Den består oftest av en porøs polyetylen- eller polypropylenfilm. [108]

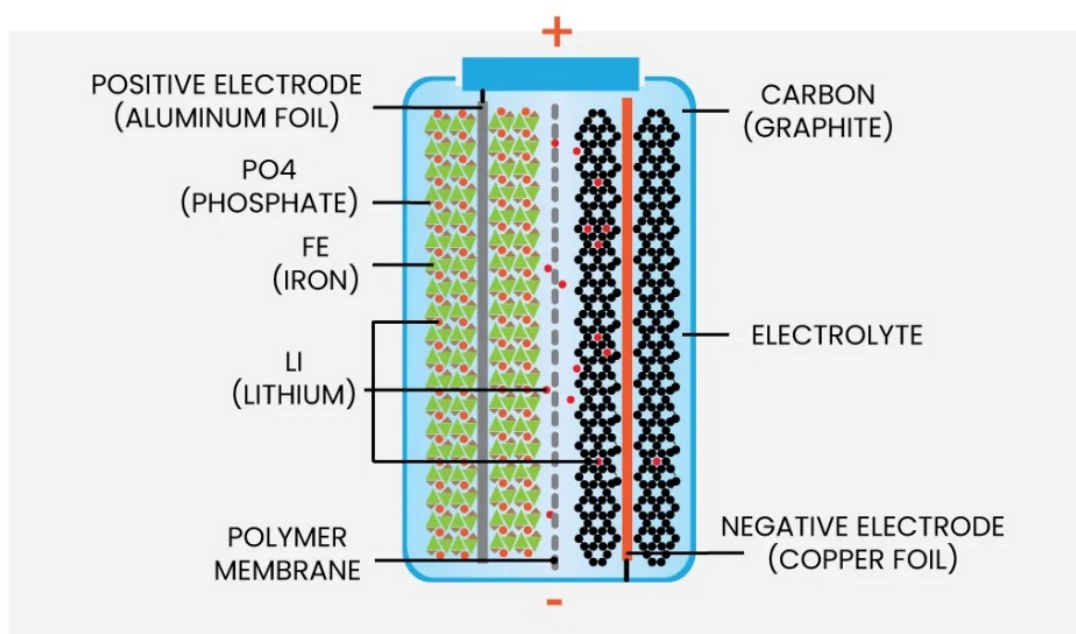


Figur 5.2: Figuren viser litiumionebatteriets oppbygning og er hentet fra UL Research Institutes [109]

Elektrolytten består av litium-saltet $LiPF_6$ og en organisk løsemiddelblanding av karbonater. Denne elektrolytten brennbar elektrolytt og medfører dermed en risiko. Anoden består av karbon, ofte grafit.

Katoden består som regel av en blanding av litium, oksygen og ulike metaller. [108] De mest vanlige litiumionebatteriene sine katodematerialer er Li-Ni-Mn-Co-oksidi i NCM-batterier, Li-Mn-oksidi i LMO-batterier, Li-Ni-Co-al-oksidi i NCA-batterier og Li-Fe-fosfat i LFP-batterier [105]. Katodematerialene avgjør battericellens egenskaper og kan variere for ulike litiumbatterier. Når litiumionebatteriet lades, beveger litiumioner seg fra katoden til anoden, mens elektroner strømmer via en ekstern krets. Det motsatte skjer ved utlading av batteriet. Når elektronene strømmer gjennom den eksterne kretsen genereres det strøm. [108]

Som nevnt tidligere avgjør katodematerialet egenskapene til batteriet. Litiumjernfosfatbatteri (LFP) har $LiFePO_4$ som materiale i katoden, derav navnet. I et LFP batteri er atomene ordnet i en krysallinsk struktur som danner et 3D-nettverk av litiumioner. De fungerer på samme måte som andre litiumionebatterier, litiumioner beveger seg mellom positiv og negativ elektrode for at batteriet skal lade og utlade. [110] Oppbygningen av batteriet vises i figur 5.3. Jern- og fosfatene danner et gitter som løst fanger litiumionene. Under lading trekkes disse litiumionene lett mot den negative elektroden gjennom membranen i midten. [111]



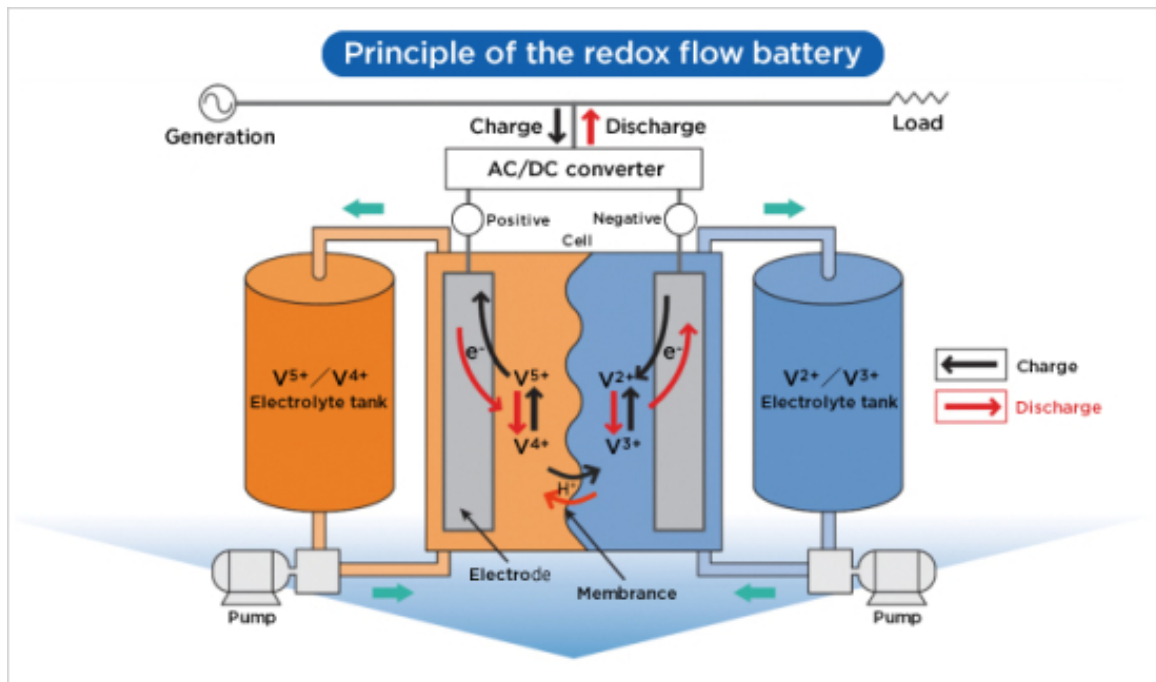
Figur 5.3: Figuren viser LFP-batteriets oppbygning og er hentet fra Sinovoltaics [112]

Cellene i et LFP-batteri taper kapasitet langsomt og dette fører til at batteriet har en lang levetid. Det har også en relativt lav driftsspenning og dette fører til at cellene er mindre utsatt for reaksjoner som påvirker kapasiteten. LFP-batteriet er termisk og kjemisk stabilt, dette gjør at det mindre utsatt for eksplosjoner eller brann. Co-O-bindingen er sterk i LFP-batterier, så hvis de kortsluttes eller overopphetes, frigjøres oksygenatomer langsommere. Det er heller ikke noe litium igjen i fulladede celler, dette gjør dem svært motstandsdyktige under oksygentap. LFP-batterier inneholder hverken nikkell eller kobolt, som er forsyningsbegrensede, dyre og har en større miljøpåvirkning. [110]

Et annet utbredt litiumionebatteri er NCM-batteriet. NCM er sammensatt av litium, nikkell, kobolt og mangan. Nikkell har en høy spesifikk energi, men dårlige stabilitet. Mangan har lav spesifikk energi, men danner spinellstrukturer som gir en lav indre motstand. Den termiske stabiliteten til NMC-batterier avtar med økende nikkellinnhold. Jo mer nikkell, desto lavere starttemperatur for faseovergangen og desto større topper av oksygenfrigjøringen. Mangan er veldig termisk stabil og kan forbedre batteriets termiske stabilitet, men reduserer kapasiteten. Kobolt er også en viktig bidragsyter for å opprettholde god termisk stabilitet. [113] NCM-batteriets litiumioner kan bevege seg i to forskjellige retninger. Dette

fører til en høy diffusjonshastighet og elektronmobilitet, som gir batteriet en høy effekt og energitetthet [114].

Det finnes også andre batterityper på markedet. Alle de ulike batteriene har ulike egenskaper og bruksområder. En nylig utbredt batteriløsning er vanadium redoks flytbatterier. De fungerer ved at en membran utveksler ioner fra en elektrolytt som sirkulerer på hver side av membranen ved bruk av pumper som vist i figur 5.4. Elektroden består av et porøst karbonmateriale, mens membranen ofte er basert på Nafion. Elektrolytten er vanadiumioner løst i svovelsyre og vann. [105] Begge sider av elektrolytten er sammensatt av vanadium og dette fører til at reaktantene ikke går tapt [115]. Av den grunn kan elektrolytten gjenvinnes og brukes på nytt igjen, samt byttes uten at hele systemet må skiftes ut. [105]



Figur 5.4: Figuren viser flytbatteriets oppbygning og er hentet fra Green Car Congress [116]

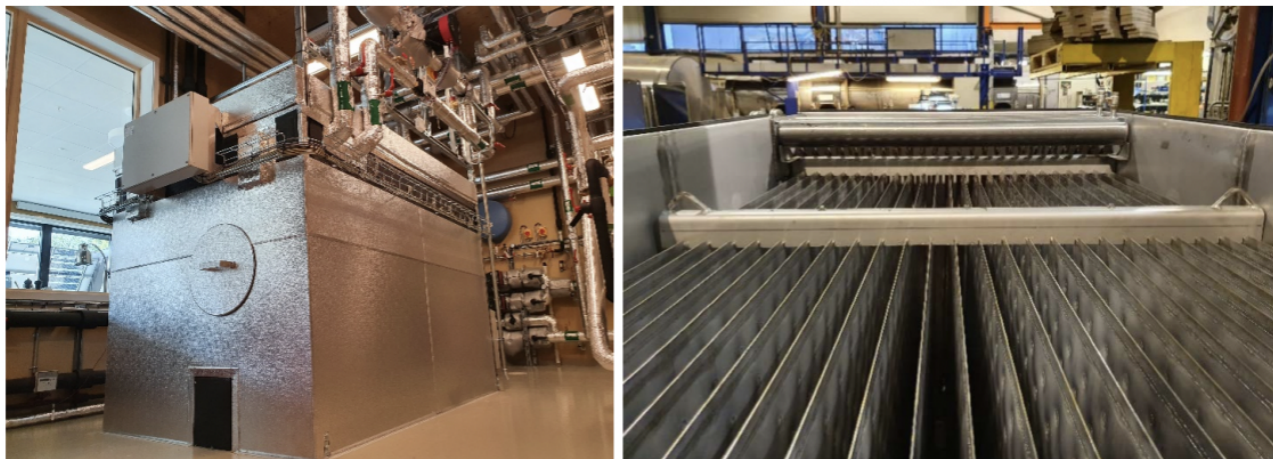
En annen energilagringsmetode er å lagre overskuddsstrømmen i et virtuelt batteri. Fjordkraft har en tjeneste for dette som heter solkonto. Kunden trenger da ikke å investere i et fysisk batteri for å lagre strøm. Solkonto er et digitalt batteri hvor energien lagres med mulighet for uttak av denne energien når kunden ønsker det. Overskuddsproduksjonen av strøm kan lagres inntil 18 måneder. Med solkonto vil det ikke være effekttap, selv om energien lagres over flere måneder. Dette er en god løsning for lagring av overproduksjon på sommerhalvåret, men denne løsningen er enda ikke mulig for bedrifter. [117]

5.2 Termisk energilagring

Rundt halvparten av det totale energibehovet til næringsbygg er i form av termisk energi, altså varme. Termisk energilagring fører til en mer pålitelig, fleksibel og bærekraftig håndtering av det termiske energibehovet. Et stort energibehov vil føre til en høy topplast. Denne kan kuttes ved bruk av energilagring. [105]

En løsning som kan benyttes til å lagre termisk energi er PCM (Phase Change Material – faseendringsmaterialer). PCM er en metode som utnytter overgangstilstanden i et materiale til å lagre energi

i form av varme. Den er basert på absorpsjon eller frigjøring av varmeenergi gjennom faseendring i materiale. Siden materialer går fra flytende til fast tilstand ved tilnærmet konstant temperatur, er det mulig å lagre store mengder termisk energi fra varme eller kalde strømmer, kun få grader over eller under driftstemperaturen. [118] Ved å bruke PCM med forskjellige smeltetemperaturer, kan termisk energi blir produsert og lagret over et større temperaturområde. Det er hensiktsmessig å bruke en pute-plater varmeveksler i samspill med PCM for å oppnå en høy varmeeffekt ved behov. I tillegg blir varmelagringskapasiteten høy. I denne oppgaven fokuseres det på lagring av elektrisk energi og derfor skal det ikke gås videre inn på termisk energilagring. [105]



Figur 5.5: *Figuren viser til venstre; PCM-varmelager i ZEB-labaratoriet og til høyre; Puteplater i varmelageret uten PCM. Bildene er hentet fra Sintef [105]*

5.3 Bærekraft og miljø

Mange batterier inneholder miljøgifter som kan være skadelig for natur, dyr og mennesker hvis de slippes ut. De inneholder også verdifulle stoffer som det er begrensede mengder av i naturen. Dette betyr at både den første og siste fasen av batteriets livsløp er viktig for å avgjøre hvor miljøvennlig batteriet er. Det mest miljøvennlige er et lukket kretsløp, en sirkulær økonomi, hvor brukte batterier gjenvinnes til nye. [119]

I Norge og resten av Europa er det flere bedrifter som lager batterier til stasjonær energilagring basert på brukte elbilbatterier. Millioner av disse batteriene vil flomme markedene de neste årene og det eksisterer foreløpig ikke et godt system for håndtering av de. Det er derfor et stort potensiale for å gjenbruke disse batteriene til stasjonære applikasjoner. Siden batteriene allerede har vært brukt, vil levetiden være kortere, men de vil fungere like godt til en betydelig rimeligere pris. Miljøfotavtrykket deres vil også reduseres betydelig. Dette er fordi elbilbatteriet vil få en forlenget levetid. [120]

EU har en eksisterende batteriforordning som er fra 2006, men den skal fornyes. Batteriforordningen har som formål å lage et regelverk for batterier som sikrer bærekraft i hele verdikjeden; uttak av råstoffer, produksjon, bruk og materialgjenvinning av ressursene. Batterier er en sentral komponent i det grønne skiftet og batteriforordning vil bidra med at elektrifiseringen av samfunnet skjer med så bærekraftige batterier som mulig. [121]

5.4 Sikkerhet

Et energilagringssystem vil komme inn under definisjonen av en teknisk installasjon, og dermed omhandles av TEK17 § 11–10 *Tekniske installasjoner*, som sier at tekniske installasjoner skal prosjekteres og utføres slik at installasjonene ikke øker faren for at brann skal oppstå eller at brann og røyk sprer seg. [108]

Litiumbatterier, som nevnt tidligere, består av en anode, en katode, en elektrolytt og en separator. Den organisk løsningsvæske i elektrolytten er svært brennbar. Om en brann oppstår er det sjeldent på grunn av feilfunksjoner innad i batteriet, men heller ytre årsaker. Batterier i stasjonære energilagringssystemer er ikke utsatt for samme ytre påkjenning som batterier i mobile applikasjoner. Det er derfor lading/utlading og overoppvarming som er de vanligste årsakene til brann i batterier som skal brukes til stasjonær energilagring. [18]

I alle batterier er det en fare for thermal runaway. Det vil si at det oppstår ukontrollerbare eksoterme reaksjoner i batteriet, som fører til en temperaturøkning og etter hvert avgassing fra batteriet. Disse gassene kan antenne og føre til en batteribrann [18]. Det oppstår sjeldent brann i Litiumbatterier, men når det skjer er konsekvensene store. Dersom batteriet brenner/eksploderer kan det dannes giftige gasser som blant annet hydrogenfluorid. [105].

Vanadiumbaserte flytbatterier har en vannbasert elektrolytt og det er derfor liten fare for brann/eksplosjon ved opphetning av disse batteriene. Derimot er elektrolytten giftig og utgjør en fare ved eventuell lekkasje. Slik som alle andre batterier vil flytbatteriet utvikle varme når det er i bruk. [105]

5.5 Styringssystemer

I sammenheng med produksjon av fornybar energi i kombinasjon med energilagring er EMS (Energistyringssystemer) et system som administrerer, overvåker og påvirker energiforbruket. EMS regnes som hjernen i energilagringssystemet. Den overvåker nettbehov og styrer overføringen av energi mellom batteriet og nettet ved å sende ut et signal for å enten lade eller utlade batteriene. Dette er avhengig av gitte spesifikasjoner, samt ladetilstanden (SoC) og helsetilstanden (SoH) til batterisystemet. I et energisystem med solceller og batterier vil EMS avgjøre når batteriet skal lade fra solcelleproduksjonen og fra nettet. I tillegg kommuniserer EMS den generelle tilstanden til systemet. EMS er bindeleddet mellom nettet og BMS (batteristyringssystemet). [122]

BMS overvåker, kontrollerer og beskytter batteriene på et cellenivå og helt ut til selve banken [122]. Systemet overvåker spenning, temperatur, brannvarsling og ladetilstanden (SoC) til batteriet [123]. Ofte består BMS av flere nivåer, hvor det høyeste nivået rapporterer direkte til EMS. Grensesnittet mellom batterisystemet og nettet kalles PCS (Strømkonverterings system). Dette systemet transformerer strømmen fra AC i nettet til DC i batteriet og omvendt. PCS kommuniserer med EMS for å rapportere om status, utføre grunnleggende operasjonelle funksjoner og for å oppdage og beskytte mot eksterne feil. [122]

Hele systemet kalles BESS (batterienergilagringssystem) og består av battericeller satt sammen i moduler, et overordnet styresystem, et batteristyringssystem (BMS) og et strømkonverterings system (PCS). [104]

5.6 Batterisystemer i Trondheim Katedralskole

Denne delen vil beskrive viktige parametre å ta hensyn til ved dimensjonering og energiutveksling i Trondheim Katedralskole prosjektet. I tillegg vil leseren få innblikk i plusskundeordningen og lovverket

knyttet til energiutveksling.

5.6.1 Dimensjonering

Batterianlegget bør klare å lagre energi om sommerhalvåret når behovet for energi er lite og produksjonen er størst. På vinterhalvåret må anlegget klare å lagre energien fra strømmettet i lavlastimer og bidra til å utjevne effekttopper i høylasttimer. Batterianlegget i denne oppgaven skal kunne dekke minimum 30 % av effektbehovet i skolens driftstimer. Det skal kunne levere minimum 75 kW effekt med en batterikapazität på 350 kWh.

Når man skal bestille et batterisystem bør det kartlegges hvilke bruksområder batterisystemet skal bidra med, styringssystem, plassering og kapasitet. Det er viktig at batteriet har den nødvendige kapasiteten i kWh, til å lagre energien som blir produsert. Den må også klare å levere den effekten en vil bruke, og denne verdien er gitt av produsenten i W. Det er også viktig å spesifisere hva leverandøren skal levere av vedlikeholds- og/eller driftsavtaler. [104]

I tillegg er det viktig å ta hensyn til batterianleggets størrelse og sikkerhetskrav. Batterianlegget skal ha plass i batterirommetrommet det er tildelt og mulighet for å gjennomføre alle nødvendige sikkerhetsmessige tiltak. Dette innebærer blant annet nok plass til ekspansjonsone og lufting rundt batteriet, om dette er et krav.

5.6.2 Energiutveksling

Trondheim Katedralskole vil bli en plusskunde når de nye byggene med solcelleanlegg er ferdigstilt. En plusskunde er en nettkunde som både forbruker og produserer elektrisitet. Overskuddsenergien som plusskunden produserer kan mates ut på nettet fra et eget tilknytningspunkt. Denne innmatet effekt kan overstige 100 kW. Dersom innmatingen overstiger 100 kW må kunden betale 1.36 øre/kWh i innmatingavgift. [57]

For å utnytte den produserte strømmen fra solcelleanlegget best mulig, hadde energiutveksling med byggene rundt Trondheim Katedralskole vært en god løsning. Flere av byggene rundt skolen er offentlige bygg, så det er god mulighet for samarbeid mellom disse. Dette er likevel begrenset av dagens regelverk som ikke tillater deling av strøm på tvers av eiendom, altså ved ulike gårdsnummere. Per idag kan ikke strøm deles direkte med andre eiendommer på tvers av strømmålere, verken via egen kabel eller det konsesjonsbelagte strømmettet, uten at man belastes med ulike avgifter. For bygninger som har samme eier, slik som i dette tilfellet, gjelder samme regler. De gjelder også for byggene som eies av kommunen. [57, 124]

6 Mål med prosjektet

Fokuset i denne oppgaven er å prosjektere den mest miljøvennlige og energieffektive løsningen for produksing av egen fornybar strøm, slik at Trondheim Katedralskolen kan oppnå ZEB-O krav. Det lages flere mulige scenarioer for solcelleprosjektering. Disse skal så sammenlignes. De ulike alternativene velges gjennom grundig analyse av EPD-er. Videre skal det konkluderes med det beste og mest miljøvennlige alternativet for Trondheim Katedralskole. Dette skal så legge grunnlag for beregninger som inkluderer energilagring i bygget.

Det sammenlignes ulike alternativer for elektrisk energilagring for Trondheim Katedralskole og et av alternativene skal velges. Grunnlaget er at skolen produserer mest når behovet er minst, altså i sommerhalvåret. Samt er produksjonen minst når behovet er størst, altså i vinterhalvåret. Det må dermed planlegges hva slags alternativer som vil passe best til denne skolen. Det skal i tillegg ses på ulike energilagringstrategier. Bygget skal oppnå ZEB-O krav og for å få dette til må egenprodusert strøm tilsvare 105600 kWh/år .

Prosjektets hovedmål kan kort oppsummeres i følgende liste:

- Velge en solcelleprosjekteringsmetode som gir den mest optimale produksjonen og er mest miljøvennlig.
- Foreslå et batterianlegg som er effektivt og mest miljøvennlig.
- Konkludere med den beste kombinasjonen av solceller og batterier som bidrar til å oppnå ZEB-O krav.

7 Metode

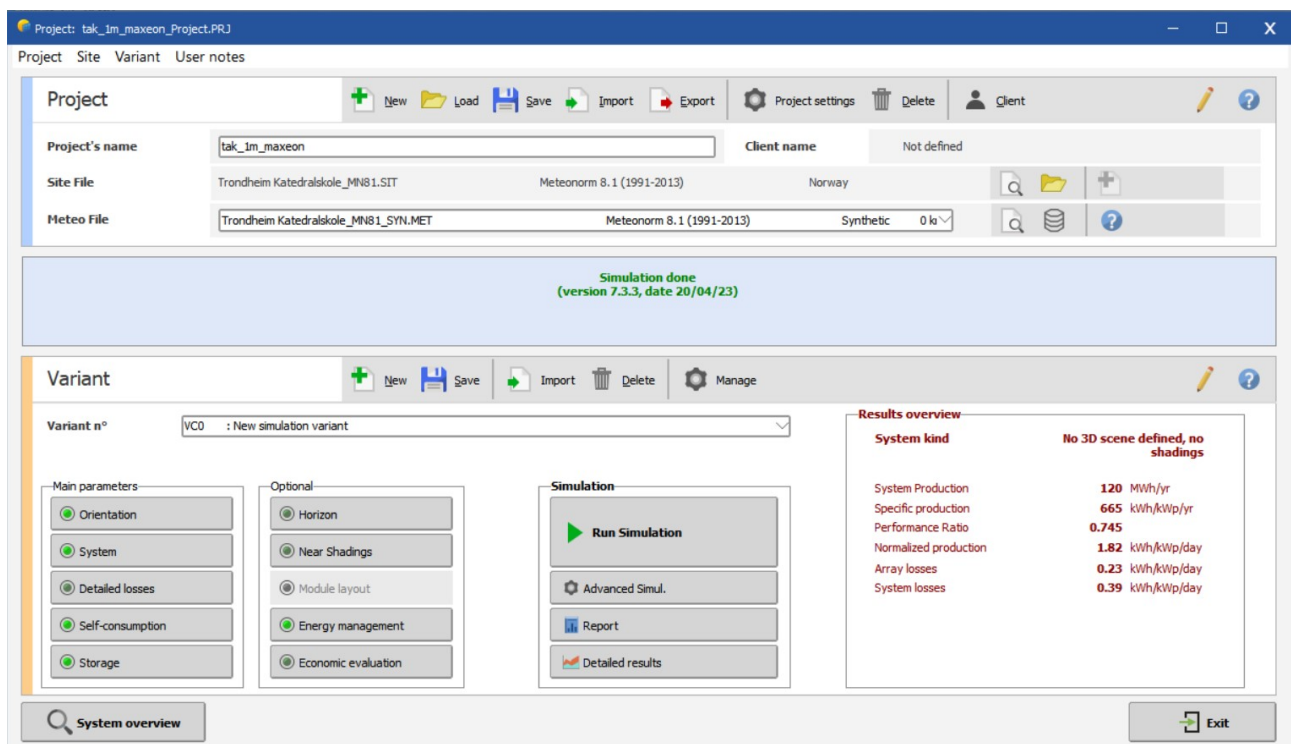
Denne delen omhandler fremgangsmåte i oppgaven. Metodedelen tar for seg gjennomgang av programmer, datainnsamling og all annen viktig informasjon som er av relevans for gjennomføring av beregninger og undersøkelser i denne bacheloroppgaven.

7.1 Fremgangsmåte

Det første som må gjøres i dette prosjektet er å velge solcellemoduler. Her ligger fokuset hovedsakelig på de mest miljøvennlige alternativene med EPD. Dette gir et godt sammenligningsgrunnlag og legger opp til at det beste alternativet kan brukes videre i prosjektet. Det skal bli sett på livsløpsanalyse til de ulike modulene i form av $kg CO_2$ -ekvivalenter per Wp . Deretter brukes den eller de beste alternativene i programmet PVSyst som beregner årsproduksjon fra panelene. Det velges så tre alternativer for elektrisk energilagring som vurderes opp mot hverandre. Disse sammenlignes på grunnlag av leverandørsikkerhet, sikkerhet, batteriytelse, størrelse og miljø.

7.2 PVSyst

PVSyst er et program som er mye brukt både på universitetsnivå og i næringslivet. Programmet tar inn alle nødvendige data som skal til for å regne på solcelleprosjektering og det gir realistiske resultater. Et bilde av programmet PVSyst er mulig å se i figur 7.1. En kan velge solcellemoduler, invertere, batterityper og egendefinert lokasjon. I dette prosjektet brukes det Trondheim Katedralskole som meteo file, altså bestemt lokasjon. Valgte koordinater er $63^{\circ}25'41.5''N$ $10^{\circ}23'41.3''E$.

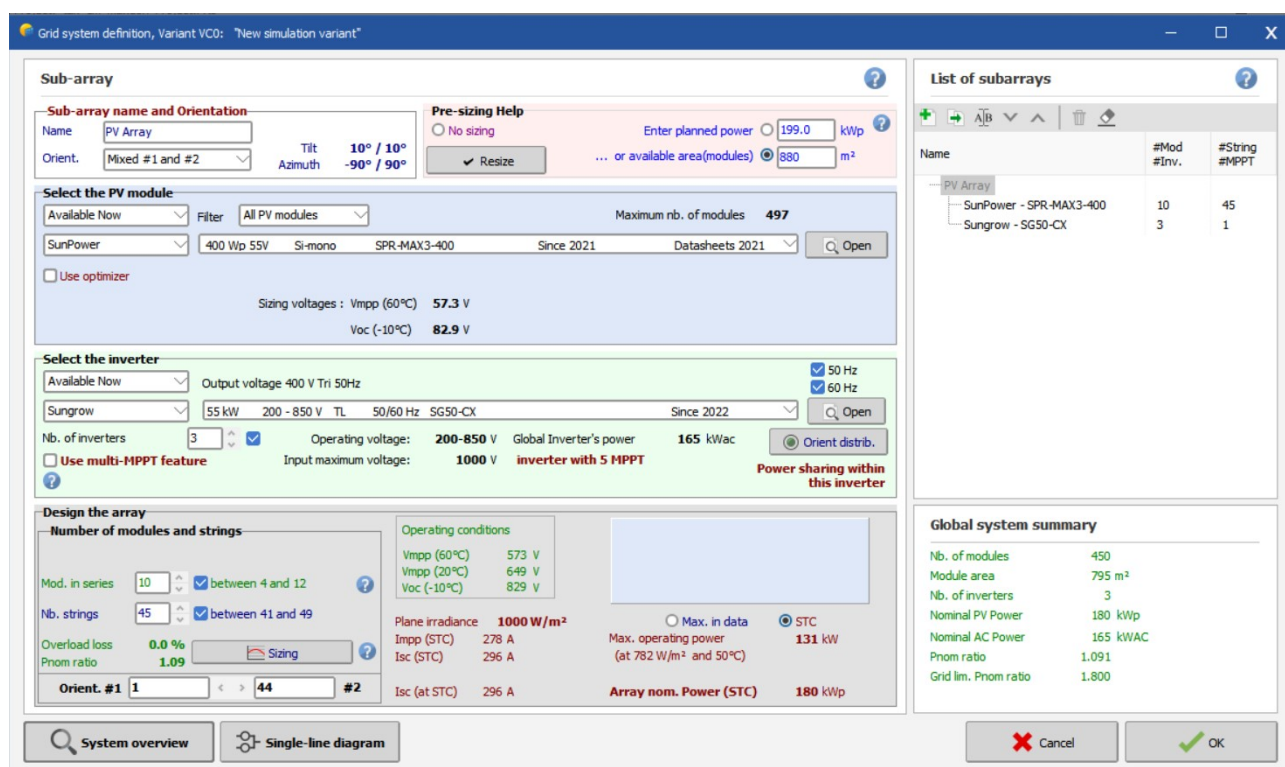


Figur 7.1: Bilde fra programmet PVSyst

Ved prosjektering på taket velges det en orientering på 10° . I PVSyst velges det i tillegg at orientering

skal være *Mixed # 1 and # 2*. *Tilt angle* settes dermed til 10° og *Azimuth angle* settes til $\pm 90^\circ$. For orientering på den østlige fasaden velges det en *tilt angle* på 90° og *Azimuth angle* på 0° . For den sørlige fasaden velges det en *tilt angle* på 90° og *Azimuth angle* på 90° . Til all prosjektering velges det en inverter av typen *Sungrow 55kW, 200-850 V, TL, 50/60Hz SG50-CX, Since 2022*.

For å få ut et riktig resultat i PVSyst må det skrives inn det totale arealet som skal brukes til solceller. Takarealet på B-bygget og Midtbygget legges sammen for et felles resultat. Takarealet blir beregnet ved å legge solceller både 1 m og 3 m fra takkant, samt som det blir trukket et areal som går til VVS. Det lages egne filer for øst- og sørfasade. Det brukbare arealet på fasaden blir regnet ut ved å finne antallet solceller som får plass i hver sammenhengende seksjon av fasaden (seksjonene er avgrenset av vinduer). Det totale arealet av solceller blir så lagt sammen og skal resultere i det totale arealet for fasaden. Solcellene blir plassert både vertikalt og horisontalt. Dimensjonene som blir brukt for å regne ut arealet av seksjonene blir hentet fra 3D programmet *Solibri*. Der blir de ulike seksjonene målt på en 3D modell av den nye Trondheim Katedralskole, tilsendt av Rambøll. Et eksempel bilde på et PVSyst prosjekteringsalternativ er mulig å se i figur 7.2.



Figur 7.2: Eksempel på et prosjekteringsalternativ med valg av areal, solcellepanel, inverter og mer. Figuren er hentet fra PVSyst

7.2.1 Månedlige produksjonsberegninger

For å gjøre beregninger på energiproduksjon med batterier i PVSyst trenger man verdier for energiforbruk. Disse ble beregnet ved å ta utgangspunkt i månedlig data fra 2022 gitt fra Rambøll, som så ble omgjort til ny data med totalt forbruk på 105600 kWh/år . Dette ble gjort ved å beregne prosenten av det totale forbruket. Forbruket i 2022 var på 760791 kWh/år , mens forventet energiforbruk i nybyggene er på 105600 kWh/år . Prosenten brukt ble derfor beregnet ved å dele forventet energiforbruk på forbruket fra 2022, altså 13.9% . Dataen fra årene 2021 og 2020 var også tilgjengelig. Den ble likevel ikke brukt grunnet usikkerhet i nøyaktigheten, da disse årene var preget av coronapandemien.

Månedsverdier for elektrisk energiforbruk blir så lagt inn i PVSyst under ”*self consumption*”. Ved planlegging av batterianlegg blir det tatt hensyn til dagens plusskundeordning som tilsier at man kan kun mate inn effekt på opp til 100 kW på strømmettet. Dette blir gjort ved å skrive inn denne begrensningen på PVSyst under ”*Grid power limitation*”.

7.3 Solcelleberegninger

For å enklere gjøre beregninger på solceller, forenkles solcellepanelet til valgte panelene til 450 Wp. I tillegg er beregningene forenklet da en ikke tar hensyn til vinkler, tidspunkt på døgnet, årstiden og temperaturen. Den nominelle solcelleeffekten for Trondheim Katedralskole beregnes ved å dele forventende energiproduksjonen fra solceller på solinnstrålingen i Trondheim. For å finne antall solcellepaneler må den beregnede nominelle effekten deles på effekten per solcellepanel. Det brukbare areal kan så beregnes ved å multiplisere antallet solceller med solcellearealet til hver av solcelletypene. Det må så beregnes utslipp fra paneler. Dette gjøres ved å dele det totale utslippet på antall solceller.

7.4 Valg av alternativer

Det blir laget mange forskjellige scenarioer med ulike solcelleløsninger, både med og uten batterier. Det brukes også 2 forskjellige arealer på tak og noen av scenarioene har fasadeløsninger. De ulike scenarioene er mulig å se i kapittel 9.1.2. Det skal så velges ut de løsningene som oppfyller ZEB-O krav, samt som inneholder batterimoduler. De endelige scenarioene er mulig å se i kapittel 9.1.3. Noen scenarioer blir laget uten batterimoduler for å vise om det er mulig å oppnå ZEB-O krav uten disse. Likevel, grunnet innholdet i prosjektspesifikk miljøoppfølgingsplan som påpeker at Trondheim Katedralskole skal ha et batterianlegg, skal det så fokuseres kun på løsninger som oppfyller ZEB-O krav og har batterier.

Etter at de ulike solcelleløsningene er valgt, skal det ses nærmere på energilagringmuligheter. Det skal undersøkes tre alternativer for elektrisk energilagring og konkluderes med det beste alternativet for dette prosjektet. Disse skal likevel ikke implementeres i PVSyst, ettersom programmet har begrenset utvalg av batterier. Av den grunn brukes det kun en type batteri i beregninger i PVSyst og det er *Weco litiumionebatterier, 52.8 V, 89 Ah, Li LFP HeSU 4k4 home ESS 86 Ah*.

Til slutt skal det konkluderes med hvilken solcelleløsning og batterialternativ som blir det beste for Trondheim Katedralskole. Dette skal gjøres ved å sammenligne de ulike resultatene opp mot hverandre. Det skal konkluderes med hvilken kombinasjonen som oppfyller ZEB-O kravene, og er mest miljøvennlig, bærekraftig og optimal.

8 Alternativsvurderinger

Denne delen av rapporten tar for seg alternativsvurderinger av ulike solcelle- og energilagringskombinasjoner med fokus på å oppfylle ZEB-O krav. Solcellemoduler blir valgt ved analyse av hvilke moduler som er mest miljøvennlige i forhold til sin effekt. Videre blir dimensjonene ved solcelleprosjektering beregnet slik at de kan benyttes videre. Energilagringmuligheter skal vurderes nøye og tilpasses Trondheim Katedralskole i kombinasjon med solceller. Til slutt skal denne delen se på andre løsninger av relevans til Trondheim Katedralskole.

8.1 Solcelleprosjektering

Solcellene på Trondheim Katedralskole skal bli prosjektert på taket til B-bygget og Midtbygget, og sør- og østfasade på Midtbygget. Solcellene på taket skal prosjekteres i 10°øst-vest-orientering for å benytte mest mulig plass og unngå skygge. På fasaden blir panelene prosjektert rett på i 90°. I dette delkapitlet skal solcellepanel velges mellom og sammenlignes. Dimensjonene for solcelleprosjektering skal også beregnes slik at de kan benyttes i PVSyst.

8.1.1 Solcellevalg

Solcellemodulene på Trondheim Katedralskole skal som tidligere nevnt gi en årsproduksjon på 105600 kWh/år for å bidra til ZEB-O. Videre skal solcellepanelene være i samme fabrikat og modell. [64] Det er derfor viktig å vurdere solcellemodulene nøye slik at de når ønsket årsproduksjon samt bidrar med minst mulig utslipp.

Tabell 8.1 viser GWP (Global Warming Potential) til de 5 solcellepanelene som er mulig å finne på EPD Norge. Utslippene måles i $kg CO_2 eq/Wp$ slik at solcelletypene kan sammenlignes. Tabellen viser at N-Peak 2 gir totalt mest utslipp av alle paneler og dette er grunnet det høye utslippet i produktstadiet (A1-A3). Dette stadiet består av råmaterialer, transport og produksjon. Videre gir N-Peak omtrent dobbelt så mye utslipp som Alpha Pure og TwinPeak 4, og omtrent 4 ganger mer utslipp enn Maxeon 3 og Series 6.

Det er Maxeon 3 og Series 6 som har minst utslipp. Det disse modulene har til felles er at de gir fra seg lite utslipp i produktstadiet i forhold til andre moduler samt som de har lavere gjenbruk og resirkuleringsverdi (D), altså de resirkuleres og gjenbrukes bedre enn andre moduler. Series 6 har minst utslipp i produktstadiet, mens Maxeon 3 har minst utslipp på resten av stadiene, som blant annet transport og montering. Derfor gir Maxeon 3 aller minst $CO_2 eq$ -utslipp. Man kan også legge merke til at det bare er Series 6 som har data for bruksfasen (B2-B3), altså ved bruk, vedlikehold, erstatninger og lignende. Det er mulig de andre modulene også gir utslipp i dette stadiet, men at det ikke er data på det. Det må derfor tas hensyn til noe usikkerhet ved sammenligning. Videre er det valgt å neglisjere utslipp fra driftsfasen ettersom at det bare er Series 6 som har utslipp i denne fasen og at den utgir en liten andel.

Tabell 8.1: Totalt GWP per solcellepanel i $kg CO_2 eq/Wp$

	A1-A3	A4	A5	B2-B3	C1-C4	D	Totalt	Kilde
N-Peak 2	1.34	0.0396	0.00358	-	0.0111	-0.0374	1.36	[85]
Alpha Pure	0.689	0.0369	0.00338	-	0.0103	-0.0306	0.709	[86]
TwinPeak 4	0.608	0.0396	0.00358	-	0.0111	-0.0374	0.624	[87]
Maxeon 3	0.342	0.0135	0.000856	-	0.00138	-0.138	0.220	[88]
Series 6	0.267	0.0378	0.00538	0.00283	0.0622	-0.0969	0.278	[89]

Ved undersøkelser rundt de beste alternativene ble det tatt kontakt med Solcellespesialisten. Etter forespørsel ble det tilsendt et tilbudsbrev som Solcellespesialisten hadde laget i kontakt med arkitektene i Katedralskole-prosjektet. PV modulen som ble brukt i fasadetilbudsbrevet var *Model KR 4/10 GG44 Kromatix* i fargen bronse. Dette er et monokrystallinsk solcellepanel på 179 Wp . Panelet har et areal på 1.176 m^2 , noe som gir 152 Wp/m^2 . [125] I tilbudsbrevet ble det ikke oppgitt noen konkrete paneler som skal brukes på taket, men etter å ha vært i kontakt med Solcellespesialisten, ble det bekreftet at de har tenkt å bruke andre moduler enn Kromatix. Dette motsier RIEs (Rådgivende Ingeniør Elektro) kravspesifikasjoner fra Trøndelag fylkeskommune som tilsier at ”*Alle PV-moduler skal være av samme fabrikk og modell, og ha lik nominell effekt.*”. [64]

Sammenlignet med andre paneler har Kromatix modulen mye mindre areal og effekt per areal. Denne lave effekten kan forekomme av at belegget i fargen bronse ikke tar til seg så mye sollys som et mørkere belegg ville gjort. Det finnes ikke EPD til denne modultypen og det er derfor ikke tilgjengelig informasjon for å kunne sammenligne panelet med de andre paneltypene. Trondheim Katedralskole er en av Norges eldste skoler og ved rehabilitering og nybygg er det fokus på at skolen fremdeles skal ha et eldre inntrykk. Man kan tenke at med implementering av solceller vil historie møte fremtid og det gjelder å finne en balanse. Med paneltypen Kromatix i fargen bronse vil Midtbygget få et eldre inntrykk som passer med andre bygg på skolen i motsetning til paneltypene Maxeon 3 og Series 6.

Hovedfokuset i denne rapporten går på å oppnå ZEB-krav og det skal derfor videre fokuseres på Series 6 og Maxeon 3 som har lite utslipp per effekt. Selv om Maxeon hadde aller minst utslipp er det valgt å også fokusere på Series 6. Grunnen til dette er at begge modulene hadde langt mindre utslipp sammenlignet med andre moduler. Ettersom at Maxeon 3 og Series 6 har ulik størrelse, effekt og modultype, blir det relevant å teste ut begge moduler i videre beregninger.

8.1.2 Beregninger med solceller

Den nominelle effekten for en solcelle angis ofte som kWp . Denne effekten avhenger av innstrålt solenergi i kW/m^2 . Dette betyr av solcellen ved 25°C gir ut 1 kW effekt dersom solinnstrålingen er på 1 kW/m^2 . [126] Solinnstrålingen i Trondheim skal ligge på rundt 800 kW/m^2 mot horisontal plate, og da vil omtrent en solcelle med installert topp effekt 1 kWp oppnå 800 kWh per år. Trondheim Katedralskole sitt solcelleanlegg skal produsere 105600 kWh/år . Med denne verdien og solinnstråling på 800 kW/m^2 kan effekten beregnes til å være 132 kWp som vist i ligningen 3. Denne effekten er funnet ved en forenklet beregning av hva som trengs på Katedralskolen ettersom at produksjonen kan avhenge av vinkler, tid på dag, årstid og temperatur.

$$Effekt = \frac{105600 \text{ kWh}}{800 \text{ kWh/m}^2} = 132 \text{ kWp} \quad (3)$$

Effekten av Maxeon 3 er 400 Wp mens Series 6 har en effekt på 420 Wp til 450 Wp . For å forenkle beregninger velges det dermed å bruke 450 Wp videre for Series 6. Tabell 8.2 viser beregninger med solcellepanelene Maxeon 3 og Series 6 ved bruk av en effekt på 132 kWp . For å finne antall solcellepanel ble 132 kWp delt på effekten til solcellepanelet. Arealet ble beregnet ved å multiplisere antall solceller med solcellearealet. Utifra beregninger ser en at Series 6 trenger mer areal enn Maxeon 3, for å produsere nok energi. I tillegg viser tabellen at Maxeon 3 gir mindre utslipp enn Series 6. Dersom det ønskes å se på utslipp per panel kan dette gjøres ved å dele utslippet på antall solceller. For et panel vil altså utslippet ligge på $88 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ for Maxeon 3 og omtrent $125 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ for Series 6.

Tabell 8.2: Beregninger med Maxeon 3 og Series 6 ved 132 kWp

Solcelletype	Effekt [Wp]	Antall solceller	Areal [m ²]	Utslipp [kg CO ₂ eq]
Maxeon 3	400	330	585.75	29040
Series 6	450	294	726.18	36696

Normalt ligger levetiden til solcellepanel på rundt 25 til 30 år og i følge EPD-ene til panelene har Maxeon 3 en levetid på 25 år mens Series 6 har en levetid på 30 år [88, 89]. Solcellepanelene skal ikke slippe ut CO₂ eq i driftsfasen men under produksjon. I ligningene 4, 5, 6 og 7 vises beregninger på hvor mye utslippet fra produksjonsfasen ville tilsvart per år dersom en ser på hele livstiden til panelene. Deretter vises beregninger for hvor mye dette vil tilsvare i elektrisiteten som blir produsert, altså per kWh. Dette blir gjort for å få en bedre sammenligningsgrunnlag mellom panelene da de har forskjellige levetider.

$$Utslipp M3 = \frac{29040 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{25} = 1161.1 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \quad (4)$$

$$CO_2 \text{ eq} - \text{faktor for strøm produsert M3} = \frac{1161.1 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{105600 \text{ kWh}} = 11.0 \text{ g CO}_2 \text{ eq/kWh} \quad (5)$$

$$Utslipp S6 = \frac{36696 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{25} = 1223.2 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \quad (6)$$

$$CO_2 \text{ eq} - \text{faktor for strøm produsert S6} = \frac{1223.2 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{105600 \text{ kWh}} = 11.6 \text{ g CO}_2 \text{ eq/kWh} \quad (7)$$

Disse beregningene viser at Maxeon 3 kommer best ut i forhold til effekt for arealet. Under tidligere livsløpsberegninger kom også Maxeon 3 best ut på utslipp per Wp. Dersom en ser på levetiden til solcellepanelene er det ikke så mye som skiller utslippene til panelene fra hverandre. Det er dermed valgt å gå videre med begge paneler under PVSyst beregninger.

8.1.3 Dimensjoner for prosjektering

Dimensjonene for prosjektering blir først beregnet på tak ved 2 ulike metoder. Disse metodene er ved 3 m avstand fra takkant og 1 m avstand fra takkant hvorav det kreves sikringer dersom 1 m blir valgt. Det velges 3 m avstand ettersom det den minste avstanden en kan ha uten å bruke sikringer. Avstanden på 1 m velges da det vil gi større totalarealet, og likevel sørge for tilgang til takkanten. For fasade vil de ulike størrelsene på de ulike solcellemodulene, Series 6 og Maxeon 3, bli benyttet for korrekt beregning. Dette delkapitlet vil også ha med figurer med et forslag til hvordan det vil se ut med de ulike prosjekteringenene. Disse figurene er designet i programmet Adobe Photoshop.

Dimensjoner på tak

Ved prosjektering av solcelleanlegg er det ofte gjort en skyggeanalyse for å unngå skygge på paneler slik at de ikke kobles ut og påvirker hele strengen av paneler. På tak er det ofte plassert VVS føringer som kan gi skygge og ta plassen til solcelleanlegg. Gruppen har ikke fått nok informasjon om størrelsen til gjenstandene på taket til Trondheim Katedralskole, men har fått tildelt tegninger over VVS føringer på taket. Gruppen har dermed skallert bildet og kommet frem til et areal over gjenstandene for å

trekke dem fra det totale arealet når videre beregninger blir gjort. En oversikt over arealene vises i tabell 8.3. Ved disse beregningene har gruppen valgt å trekke 21.5 m fra arealet til taket i videre beregninger over brukbart areal.

Tabell 8.3: *Oversikt over VVS utstyr på taket på Trondheim Katedralskole og deres beregnende verdier*

	Antall	Areal [m^2]
Taksluk	8	9.05
Avkast	3	4.04
Kombinert inntak/avkast	2	7.10
Vifter	2	1.28
Totalt		21.5

Tabell 8.4 viser en oversikt over dimensjonene til Midtbygget og B-bygget. Brukbart areal til solcellepanel er valgt ved å sette 3 m fra takkanten og trekke fra 21.5 m til VVS. Det totale takarealet som kunne bli brukt til solcellepanel var 539.4 m^2 . Tabell 8.5 viser brukbart areal ved forskrift 712C.2.3 altså 1 m fra takkant og hvor 21.5 m er tatt vekk. Det totale takarealet som kan bli brukt til solceller var 859 m.

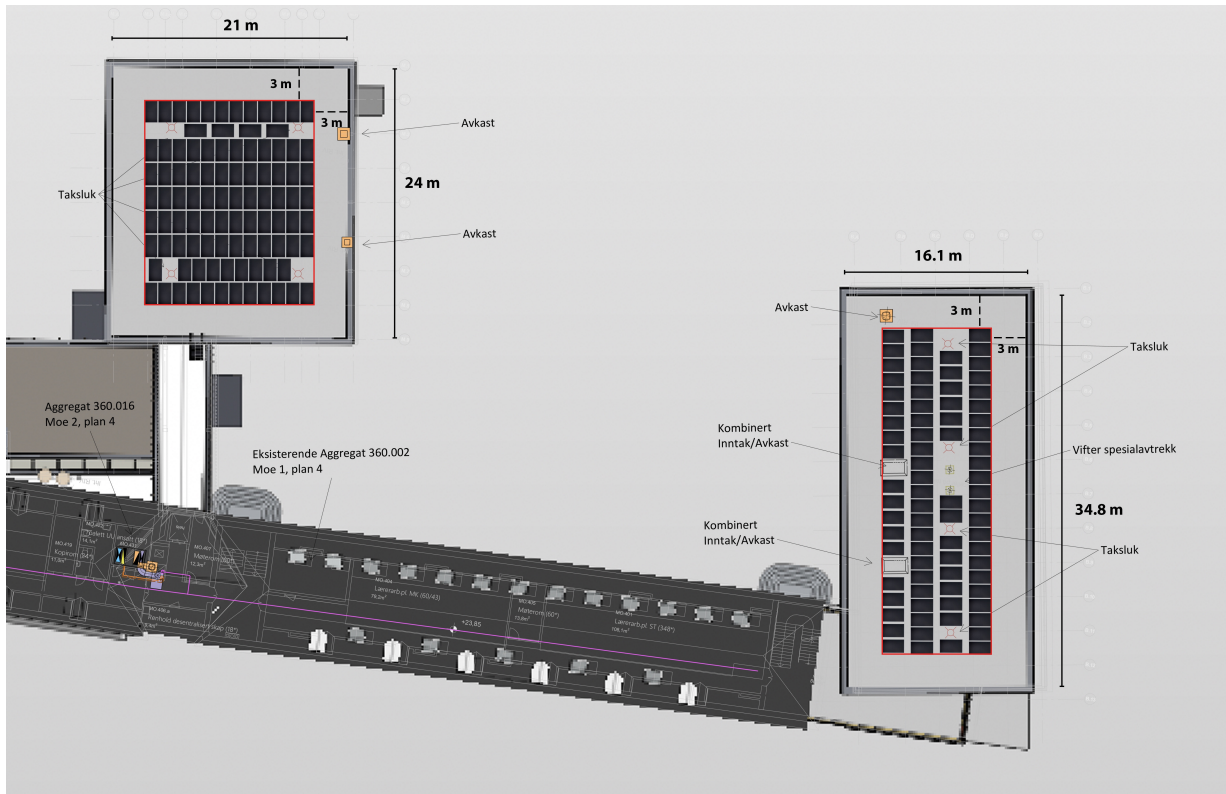
Tabell 8.4: *Takdimensjoner med areal og brukbart areal til solcellepanel for 3 m fra takkant*

	Lengde [m]	Bredde [m]	Areal [m^2]	Brukbart areal [m^2]
Midtbygg	24.0	21.0	504.0	262.8
B-bygg	34.8	16.1	560.3	276.7
Totalt takareal				539.4

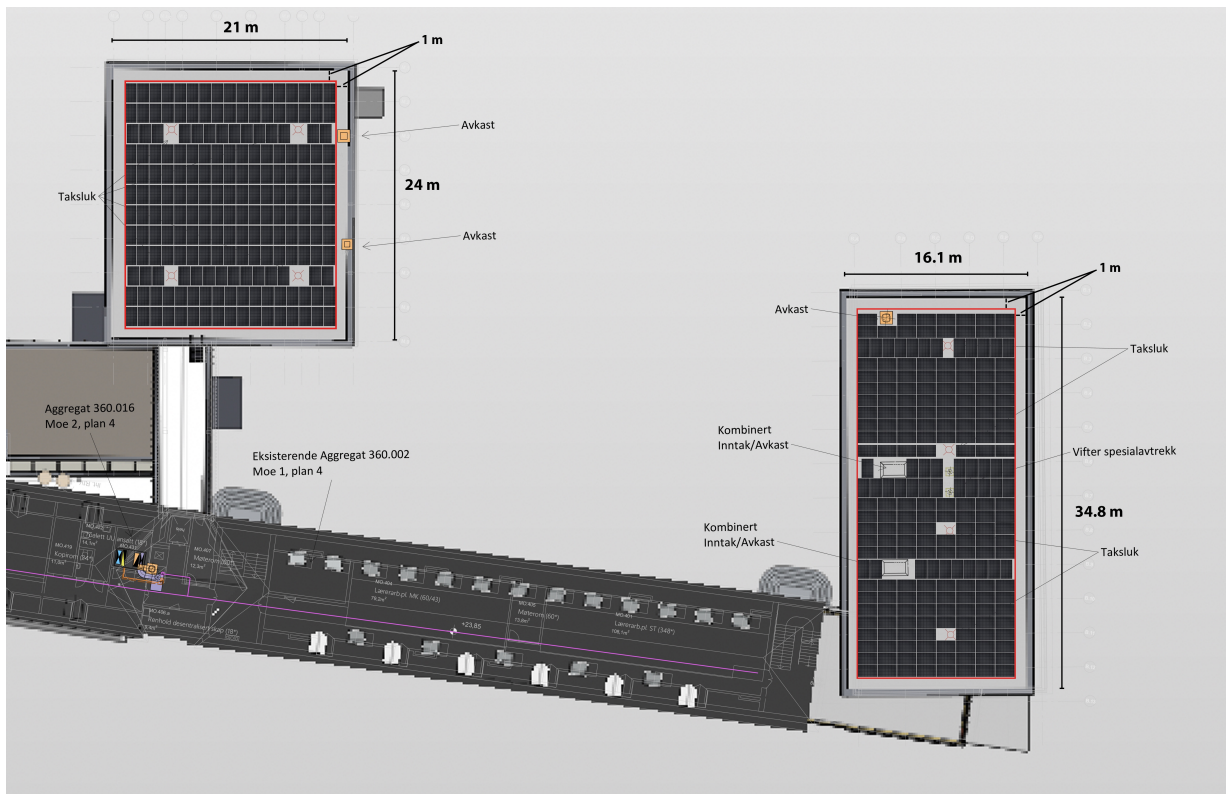
Tabell 8.5: *Takdimensjoner med areal og brukbart areal til solcellepanel for 1 m fra takkant (forskrift 712C.2.3)*

	Lengde [m]	Bredde [m]	Areal [m^2]	Brukbart areal [m^2]
Midtbygg	24.0	21.0	504.0	455.3
B-bygg	34.8	16.1	560.3	403.8
Totalt takareal				859.0

Figur 8.1 viser et eksempel over prosjekteringen på tak ved 3 m avstand. Her vises hvilke VVS gjenstander som er på de forskjellige takene. Samtidig ser man mål og lengder på taket. Her er modulen Series 6 brukt som solceller og det er ikke et reelt bilde som viser eksakt mengde og plassering av solceller. Solcellene vil prosjekteres i 10° og denne helningen vises ikke i denne figuren. Figur 8.2 viser det samme, men for 1 m avstand fra takkant og med modulen Maxeon 3.



Figur 8.1: Prosjektering av Series 6 solceller på taket med 3 m avstand fra kanten. Bildet er laget i Photoshop

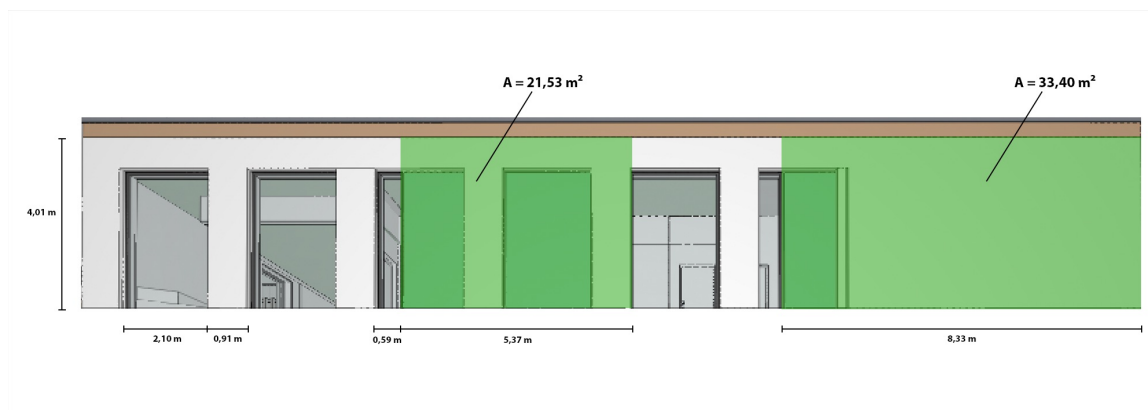


Figur 8.2: Prosjektering av Maxeon 3 solceller på taket med 1 m avstand fra kanten. Bildet er laget i Photoshop

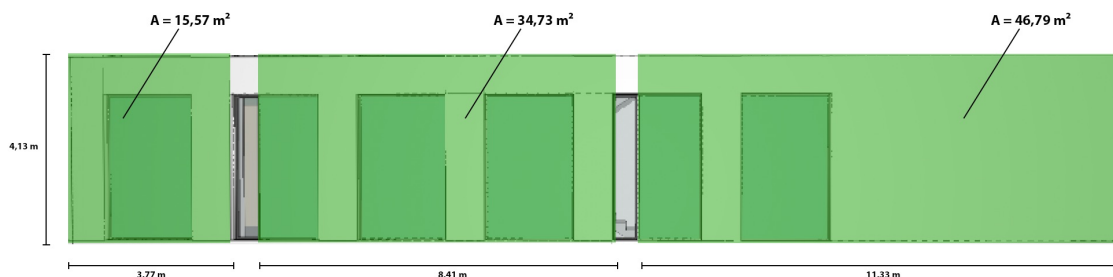
Forskjellen ved bruk av disse metodene er at bruk av 1 m avstand gir et større areal og dermed mer produksjon fra sollys. Her må sikringer brukes ved montering, noe som øker kostnad og materialbruk. Selv om et areal på omtrent 860 m gir mye mer plass til solcelleproduksjon er det valgt å undersøke begge løsningene. Ved bruk av et større areal kan solcelleproduksjonen muligens bli for høy slik at strømmen for det meste må selges til nettet. Det er en innmatingsgrense på strømnettet på 100 kW som ikke bør overskrides, da dette medfører ekstra kostnader. Det kommer i tillegg større kostnader grunnet flere solceller og økt utslipp fra disse.

Dimensjoner på fasade

I tillegg til solceller på taket til B-bygget og Midtbygget er det tenkt å plassere solceller på sør- og østfasade til Midtbygget. Figur 8.3 viser dimensjonene til 3. etasje av den sørlige fasaden til Midtbygget mens figur 8.4 viser 2. etasje av den sørlige fasaden til Midtbygget. De grønne arealene på bildet viser hvor på fasaden det er tenkt å plassere solceller. Ingeniørene og arkitektene i prosjektet har tenkt til å kun bruke de tettende vindusfeltene - de mørkegrønne områdene - til å plassere solceller. Gruppen har likevel bestemt seg for å undersøke hele den tilgjengelige fasaden - de grønne feltene - for å utnytte arealet best mulig og oppnå størst mulig produksjon.



Figur 8.3: Den øverste delen av den sørliggende fasaden. Bildet er laget i Photoshop



Figur 8.4: Den nederste delen av den sørliggende fasaden. Bildet er laget i Photoshop

I stedet for å legge inn det totale arealet av den tilgjengelige plassen på fasaden hvor det er tenkt å prosjektere solceller, er det valgt å finne et brukbart areal - altså det arealet som blir direkte tatt opp av solceller. Det ble beregnet et areal for hver av delene på fasaden og solcellene ble prosjektert utifra

disse arealene. Grunnen til at arealene ikke blir slått sammen til en felles del, er at det er mellomrom imellom tilgjengelig plass. Dette kan dermed begrense antall solceller som får plass på hvert delareal. Dette er mulig å se i figurene ovenfor. Brukbar areal ble regnet ut for 2 forskjellige moduler, Series 6 og Maxeon 3. Tabell 8.6 viser dimensjonene til solcellepanelene, Series 6. For å finne brukbar areal på fasaden ble det valgt å finne ut hvor mange paneler som maksimalt kunne bli plassert på fasaden. Det ble da valgt å underøke en kombinasjon av vertikale og horisontale solceller for å benytte mest mulig areal.

Tabell 8.6: Dimensjonene til solcellepanel: First Solar Series 6

	Series 6
Lengde	2.01 m
Bredde	1.23 m
Areal	2.47 m ²

Ligningene 8, 9 og 10 vises et eksempel på hvordan brukbar areal med Series 6 ble regnet på. Her brukes arealet som ligger til venstre i den 3. etasjen på sørfasaden. I beregningene er det valgt å alltid runde ned ettersom at solcellene ikke kan justeres i størrelse. Et eksempel på dette er vist i ligning 8 hvor 1.995 ble rundet ned til 1.

$$\text{Solcellepanel vertikal} = \frac{4.01}{2.01} \cdot \frac{5.37}{1.23} = 1.995 \cdot 4.366 = 1 \cdot 4 = 4 \text{ paneler} \quad (8)$$

$$\text{Solcellepanel horisontal} = \frac{4.01}{1.23} \cdot \frac{5.37}{2.01} = 3.260 \cdot 2.672 = 3 \cdot 2 = 6 \text{ paneler} \quad (9)$$

$$\text{Brukbar areal} = 6 \cdot 2.47 \text{m}^2 = 14.82 \text{m}^2 \quad (10)$$

Beregningene for resten av sørfasade ved bruk av Series 6 er vist i tabell 8.7. Totalt ligger brukbar areal på sør fasaden på 133.8 m². Figur 8.5 viser hvordan det hadde sett ut på sørfasaden dersom solcellene blir prosjektert utifra disse beregningene.

Tabell 8.7: Dimensjonene til sør fasade ved bruk av Series 6

Sør fasade				
3. etasje	Areal [m ²]	21.53	33.40	
	Antall solcellepanel	6	12	
	Brukbar areal [m ²]	14.82	29.64	
2. etasje	Areal [m ²]	15.57	34.73	46.79
	Antall solcellepanel	6	12	18
	Brukbar areal [m ²]	14.82	29.64	44.46
Totalt brukbar areal [m ²]		133.38		

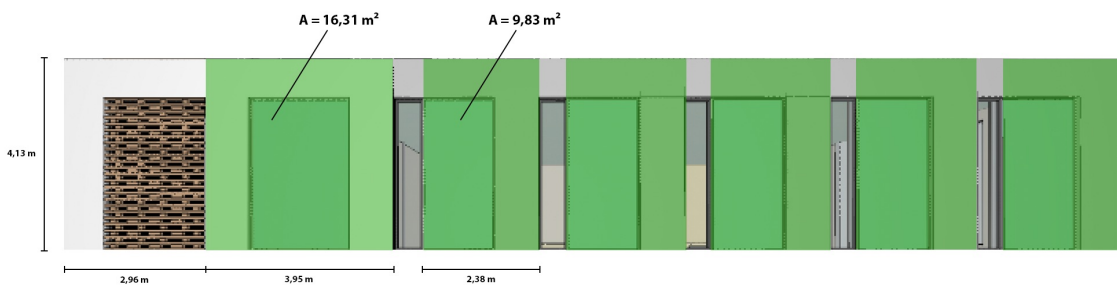


Figur 8.5: Solceller på den sørliggende fasaden med Series 6. Bildet er laget i Photoshop

Figur 8.6 viser dimensjonene til 3. etasje av østfasaden til Midtbygget mens figur 8.7 viser dimensjonene til 2. etasje av østfasaden til Midtbygget. Det grønne området på bildet er arealet hvor det vurderes å sette solceller.



Figur 8.6: Den øverste delen av den østliggende fasaden. Bildet er laget i Photoshop



Figur 8.7: Den nederste delen av den østliggende fasaden. Bildet er laget i Photoshop

Beregningene for totalt brukbart areal på østfasaden er vist i tabell 8.8. Arealet ligger på 66.7 m^2 . Figur 8.8 viser hvordan østfasaden vil se ut dersom solcellene blir prosjektert etter disse beregningene.

Tabell 8.8: Dimensjonene til øst fasade ved bruk av Series 6

Øst fasade			
3. etasje	Areal [m^2]	$9.54 \cdot 2 = 19.08$	
	Antall solcellepanel	6	
	Brukbar areal [m^2]	14.82	
2. etasje	Areal [m^2]	16.31	$9.54 \cdot 5 = 47.70$
	Antall solcellepanel	6	15
	Brukbar areal [m^2]	14.82	37.05
Totalt brukbar areal [m^2]		66.70	



Figur 8.8: Solceller på den østliggende fasaden med Series 6. Bildet er laget i Photoshop

Beregninger for brukbart areal på fasadene med Maxeon 3 ble gjort på samme måte som med Series 6. Forskjellen er at Maxeon 3 solcellepaneler har andre dimensjoner. Disse dimensjonene er representert i tabell 8.9. Det totale brukbare arealet til sørfasaden med Maxeon 3 er vist i tabell 8.10 og ligger på 116.82 m^2 . Det totale brukbare arealet av østfasaden med denne paneltypen er vist i tabell 8.11 og ligger på 60 m^2 .

Tabell 8.9: Dimensjonene til solcellepanel: Maxeon 3

	Maxeon 3
Lengde	1.69 m
Bredde	1.05 m
Areal	1.77 m^2

Tabell 8.10: Dimensjonene til sørfasade med Maxeon 3

Sør fasade				
3. etasje	Areal [m^2]	21.53	33.40	
	Antall solcellepanel	10	14	
	Brukbar areal [m^2]	17.70	24.78	
2. etasje	Areal [m^2]	15.57	34.73	46.79
	Antall solcellepanel	6	16	20
	Brukbar areal [m^2]	10.62	28.32	35.40
Totalt brukbar areal [m^2]		116.82		

Tabell 8.11: Dimensjonene til østfasade med Maxeon 3

Øst fasade			
3. etasje	Areal [m^2]	$9.54 \cdot 2 = 19.08$	
	Antall solcellepanel	8	
	Brukbar areal [m^2]	14.16	
2. etasje	Areal [m^2]	16.31	$9.54 \cdot 5 = 47.70$
	Antall solcellepanel	6	20
	Brukbar areal [m^2]	10.62	35.40
Totalt brukbar areal [m^2]		60.18	

8.2 Energilagringsmuligheter

Det finnes flere ulike energilagringsmetoder på markedet. En ting de har til felles er at de har forbedringspotensiale når det gjelder å minimere tap ved langtidslagring [127]. Dette prosjektet etterspør et batterianlegg for lagring av elektrisk energi. Anlegget bør dekke minimum 30 % av effektbehovet i driftstimer med høyest effektlast. I tillegg stilles det krav i miljøoppfølgingsplanen om at batterianlegget skal levere en minimumeffekt på 75 kW og ha en kapasitet på 350 kWh.

Batterirommet i dette prosjektet er plassert i etasje U1, altså kjelleren, på Aula-bygget, som vist i figur 8.9. Selve batterirommet er på 23.1 m^2 og det er skråtak i rommet. I laveste punkt er skråtaket på 2.0 m, mens i det høyeste punkt er det på 2.5 m. Rommet har ingen direkte tilknytning til en utgang. Dette er en potensiell fare dersom det skulle oppstå en brann, da brannvesenet ikke vil ha direkte tilgang til dette rommet. Dette blir påpekt som en mulig utfordring i møte med Evyons Business Development Manager, se vedlegg F, da sikkerhetsregelverket kan bli oppdatert med tilbakevirkende effekt og dermed kreve omplassering av et eventuelt batterianlegg.



Figur 8.9: Utsnitt av kjelleren på Aula-bygget. Rødt avgrenset område viser batterirommet. Bildet er hentet fra Rambøll.

Flere ulike energilagringssystemer er blitt undersøkt, og det er 3 teknologier som det er valgt å fokusere på i denne oppgaven. Det er redoks flytbatterier med vanadium-basert elektrolytt fra leverandør Bryte, nye litiumionebatterier (LiB) fra leverandøren Pixii og gjenbrukte litiumionebatterier fra elbiler fra leverandøren Evyon. Det er satt fokus på batterienes effekt, levetid, sikkerhet knyttet til bruk av disse, størrelse og ikke minst karbonfotavtrykket. I denne delen skal alle batterityper og selskaper introduseres og ulike parametre ved deres batterier skal sammenlignes.

Alternativ 1 - Bryte - Vanadium flytbatterier

Flytbatterier er elektrokjemiske batterier med en flytende elektrolytt, som strømmer gjennom en eller flere battericeller [105]. Batteriet som skal vurderes her er et redoks vanadium flytbatteri fra den norske produsenten Bryte. Dette er en type batteri som er nokså ny på det norske markedet og det er ikke tatt i bruk i storskala enda. Selskapet Bryte hadde sin oppstart i 2020 og deres første batterianlegg befinner seg på Sluppen i Trondheim. Dette kom frem i møte med Bryte som er mulig å se i vedlegg D. Grunnet at bedriften er i tidlig utviklingsfase, er flere av tallene knyttet til anlegget deres ikke blitt etterprøvd og det bør derfor tas hensyn til noe usikkerhet. Vanadium redoks flytbatterier anses likevel som en spennende mulighet som kan være verdt å satse på og velges dermed som et av alternativene i prosjektet.

En fordel med disse batteriene er at det ikke er fare for eksplosjon siden 50-70 % av batteriet består av vann. Dette gjør at det ikke er behov for ekspansjonsone i batterirommet og det kreves derfor færre sikkerhetstiltak. Dette understrekte Head of Growth i Bryte AS i møte og er mulig å lese i vedlegg D. En ulempe med disse flytbatteriene er at ved for lave temperaturer vil elektrolytten bli viskøs og kan potensielt fryse. Dette gjelder for temperaturer under -10°C . Dersom batteriet plasseres innendørs vil det ikke være behov for ekstra oppvarming. Det er likevel en risiko knyttet til elektrolyttlekkasje ved bruk av vanadium flytbatterier. Vanadium i elektrolytten er giftig og kan ikke gå i vanlig avløp. I tillegg består batterier av hydrogengass som ved lekkasje kan være farlig. [105]

Vanadium flytbatterier skiller seg fra konvensjonelle batterier ved at de har mekanisk bevegelige deler. Dette er en risikofaktor med tanke på levetid. Levetiden til disse batteriene er også usikker ettersom batteriene bare har vært på markedet i noen få år, og ingen systemer har vært operative i lenger enn 20 år, som da er den laveste estimerte levetiden. På grunn av den umodne teknologien er det også større usikkerhet med hensyn til leverandørsikkerhet og vedlikehold på batteriene. Flytbatterier har også en lav energitetthet, noe som fører til at de opptar mye plass. [105, 128]

I kravspesifikasjoner for installasjon av $10\text{ kW}/40\text{ kWh}$ flytbatteri står det at gjennomsnittstemperaturen i løpet av 24 timer ikke bør overstige 30° og ikke gå under 10° . Rommet må i tillegg ventileres godt. Et typisk $10\text{ kW}/40\text{ kWh}$ batterianlegg veier 2800 kg med full tank, i tillegg til et stativ på 450 kg . For batteripakken med $10\text{ kW}/50\text{ kWh}$ er vekten på 3300 kg , mens vekten på stativet forblir likt. [128, 129] Batterikapasiteten på 350 kWh og effekten på 75 kW gjør at Trondheim Katedralskole har behov for 4.5-5 timers batteri. Dette ble beregnet av Head of Growth i Bryte. Til dette prosjektet har Bryte foreslått et system med 7 eller 8 stykk $10\text{ kW}/40\text{ kWh}$ batterimoduler til å ha inne. Det er også mulig å ha en container ute istedet. Totalvekten til inneanlegget vil dermed ligge på mellom $26000 - 30000\text{ kg}$. Tilbakebetalingstiden på et slikt anlegg antas å være på cirka 12-15 år. Dette kommer frem i møtoreferatet i vedlegg D.

Brytes batterianlegg på $10\text{ kW}/40\text{ kWh}$ har en tank med kapasitet på 1000 L . Størrelsen på anlegget er: bredde 2081 mm , lengde 1240 mm og høyde 1800 mm . Volumet til et slikt anlegg er dermed 4.65 m^3 . Et system til Trondheim Katedralskole, på 8 batteripakker, vil kreve et volum på 37 m^3 . Bryte stiller krav til at minimum 0.6 m mellomrom settes av foran systemet. Det anbefales også årlig vedlikehold av deres batterier. Et eksempel på et batteriskap fra Bryte er avbildet i figur 8.10.



Figur 8.10: Flytbatteriskap fra Bryte. Bildet er hentet fra brytebatteries.com [130]

Per dags dato finnes det ikke en EPD til Brytes batterier. Bryte bruker livsløpsanalysen av lignende batterier fra leverandøren VisBlue. Produksjonen av elektrolytten til disse flytbatteriene er svært krevende og klimafotavtrykket er derfor ikke så lavt som først antatt. I LCA rapporten til VisBlue kommer det frem at CO_2 fotavtrykket er 10.855 kg per batteri. Dersom en tar hensyn til gjenbrukt elektrolytt, kommer CO_2 fotavtrykket ned på 2.499 kg som er en forbedring på 77 %.[115]

Alternativ 2 - Pixii - litiumionbatterier

En form for nye litiumbatterier som skal vurderes er litiumjernfosfatbatteri (LFP) *PixiiPowerShaper ID* fra Pixii. Pixii er en bedrift basert i Norge som har ekspertise innen kraftkonvertering og energilagring [131]. Solcelleleverandøren Solcellespesialisten bruker Pixii som sin leverandør av batterianlegg. Dersom Betonmast - entreprenøren i dette prosjektet - velger å bruke Solcellespesialistens tilbud til prosjektering av anlegget på Trondheim Katedralskole, er det høyest sannsynlig at batteripakken brukt i kombinasjon med solceller vil komme nettopp fra Pixii. Av den grunn ble Pixii valgt som et alternativ i dette prosjektet, altså leverandør av nye litiumionbatterier.

LFP batterier er godt egnet for applikasjoner som krever høye belastninger og utholdenhet. [132] En annen fordel med LFP er at de ikke har kobolt (Co) som katodemateriale. Kobolt er et katodemateriale i noen typer litiumbatterier, og det er etisk kontroversielt grunnet barnearbeid og dårlige arbeidsvilkår. LFP batterier har en lavere energitetthet og lav utladningshastighet, noe som er en ulempe. Likevel, på grunn av sin lette vekt og evne til å gi store mengder energi, er batteriet lett å oppbevare og bære. [105] Figur 8.11 viser hvordan et batteriskap fra Pixii med LFP-batterier kan se ut.



Figur 8.11: LFP batteriskap fra Pixii. Bildet er hentet fra pixii.com [133]

Ved planlegging av anlegg med litiumionebatterier er det meget viktig å tenke gjennom sikkerhetsaspektet. Det er sjeldent det forekommer branner i slike batterier, men når det først oppstår en brann, kommer det store konsekvenser. Litiumbatterier brenner helt ut og brannen er veldig vanskelig å slukke. Det er i tillegg meget viktig å ha et velfungerende ventilasjonssystem som sørger for å få ut giftige gasser. Dette systemet bør ikke være koblet til ventilasjonen i resten av bygget. For å holde brannfaren lav, er det meget viktig å ha flere sensorer i batterirommet og at rommet skal være en egen branncelle. Grunnet fare for eksplosjon, bør det også sørges for en egen avlansningsvegg. Sikkerhetsaspektet ved litiumbatterier er kostnadskrevende. [134]

Litiumbatterier kan levere en høy effekt. En annen fordel med litiumbatterier er at de er godt utbredt på det kommersielle markedet [135]. Det er mange norske leverandører av denne typen teknologi, som også tilbyr service og vedlikehold. Det gir sikkerhet knyttet til beregnet levetid da batterier har vært i bruk lenge nok til å lage grunnlag for slik data. Slike batterier kan lades opp raskt ved behov, men det er ikke anbefalt grunnet at det korter ned den totale levetiden. Litiumbatterier trenger ikke regelmessig vedlikehold, men det anbefales å ha flere sensorer som kan overvåke disse batteriene til enhver tid slik at eventuelle feil kan bli oppdaget raskt nok. [105]

Pixii oppgir følgende funksjoner som best tilpasset sine anlegg [136]:

- Nettstøtte / spenningstøtte - sikkerhetsanlegg i tilfellet nettet svikter eller er overbelastet.
- Effektopp utjevning - bruke strømmen fra batteri ved høye effektopper og dermed redusere etterspørselen for strøm i høylasttider.

- Arbitrasje - bruke batteriet når strømprisene er høye, og lade batteriet når strømprisene er lave.
- PV til selvforsyning - lagre egenprodusert strøm til egenforbruk i høylasttider.
- Fleksibilitetsmarkeder - tjene penger på systemets fleksibilitet ved å selge egen energi til fleksibilitetsmarkeder.

Et anlegg til Trondheim Katedralskole med batterikapasitet på 350 kWh ville bestått av 7 Pixii batterier. Et batteriskap har en effekt på opp til 45 kW [136]. Ideell temperatur for operasjon av LiB-teknologi er mellom 20-30°C. I databladet til Pixii kommer det frem at minimumsdriftstemperaturen er 0°C og maksimumsdriftstemperaturen er 45°C [136]. Levetiden til litiumionebatterier er 10-20 år med DoD på 70-80 % [105]. Et Pixii-batteriskap veier mellom 550 – 650 kg [136]. Totalvekten av dette anlegget vil dermed være på mellom 3850 – 4550 kg. Databladet til valgte batterianlegget gir følgende dimensjoner til et batteriskap: bredde 600 mm, lengde 650 mm og høyde 1964 mm. [136] Volumet til et skap er dermed på hele 0.77 m³. For hele systemet, med totalt 7 batteriskap, er det da snakk om totalvolum på 5.4 m³. Det vil også være behov for invertere. Solcellespesialistens forslag til dette anlegget er 2 stykk SG50CX invertere fra Sungrow. Det er også disse som brukes i beregninger i PVSyst.

For litiumbatterier er battericellerproduksjonen svært energikrevende på grunn av at elektrolytten er brennbar og dermed krever spesielle tørrom under sammenstilling. Utvinning av råmaterialer til batteriet er også svært energikrevende og forårsaker derfor store utslipp. Det er vanligvis ingen tungmetaller i litiumionebatterier, som er en stor fordel for miljøet. [105] Det ble ikke funnet EPD til Pixiis anlegg, men det finnes en del livsløpsanalyser av LiB-teknologier.

En livsløpsanalyse av ulike elbil-batterier gjennomført i 2016 viser at det er LFP batterier som gjør det best på energiforbruk og utslipp, altså at begge verdiene holdes lave. Blant litiumionebatterier med forskjellige anode materialer, gjør LFP det best på miljøytelsen. [137] En annen livsløpsanalyse som fokuserer på bare LFP og NCM batterier viser at NCM batterier gjør det bedre med tanke på miljøpåvirkninger, men grunnet kortere livstid kommer LFP batterier best ut likevel [138]. En rapport fra Sintef Energi oppgir karbonfotavtrykket fra nye litiumionebatterier til 70 – 75 kg CO₂ eqv/kWh, altså mellom 24.5 – 26.3 tonn CO₂ eqv for et system på 350 kWh [105]. Systemet i Sintef Energi rapporten baserer seg da på NCM batterier.

Alternativ 3 - Evyon - gjenbrukte litiumionebatterier

Egenskapene og sikkerhetstiltak til brukte litiumbatterier vil være tilnærmet like som for nye litiumbatterier. Litiumbatterier er utbredt i stor skala. Det er stadig mer populært med elbiler som bruker litiumbatterier, og dermed begynner det å bli stadig mer populært å gjenbruke disse batteriene til stasjonær energilagring. Selv om disse batteriene ikke egner seg til bil lenger, betyr ikke det at de ikke egner seg til stasjonær energilagring. Av den grunn velges det gjenbrukte elbil litiumionebatterier som et alternativ. Leverandøren som velges i denne oppgaven er Evyon. Evyon er et nytt, norsk selskap, opprettet i 2020, som jobber med ulike energilagringmetoder ved bruk av gjenbrukte NCM elbil-batterier fra deres leverandør - Mercedes. [139]

Systemer basert på gjenbrukte litiumbatterier har ikke vært på markedet like lenge som nye batterier. Av den grunn er det større usikkerhet knyttet til levetid, ytelse og vedlikehold av disse. Det er et større behov for kontroll og ettersyn i slike batterier. Dette løses ved en grundig sjekk før batterier tas i bruk, i tillegg til montering av sensorer som kan sammenligne målt data med historiske data for å oppdage eventuelle feil. [105] Utenom dette følger disse batteriene like regler som nye litiumbatterier.

Det skal fortsatt være en ekspansjonssone grunnet fare for eksplosjon. På lik linje med nye batterier,

kan det oppstå brann i Evyons batterier også. De skal ikke være mer utsatt for brann, selv om de allerede har vært brukt. Dette på grunn av en grundig sjekk de gjennomgår før de blir tatt i bruk, påpeker Evyons Business Development Manager - Dag Henriksen. I tillegg foreslår Henriksen bruk av vann som et potensielt tiltak for å unngå at en eventuell brann sprer seg. En mulighet er å erstatte ekspansjonssone med et rom fylt med vann, for å holde brannen under vannet. Det er på grunn av at når litiumbatterier brenner så må de brenne helt ut og det er tilnærmet umulig å slukke brannen. Muligheten for å holde brannen under vannet ville i hvert fall minsket faren for spredning. Dette kommer frem i møtoreferatet i vedlegg F.

Energitettheten til gjenbrukte batterier vil vanligvis være på rundt halvparten av nye batterier. Kapasiteten vil være på 70-80 % av den opprinnelige. Maksimum effekt og strømtetthet vil derimot være den samme. Det er flere leverandører i Norge som tilbyr batteriløsninger basert på brukte litiumbatterier, hovedsakelig fra elbiler, og dette gir en trygghet med tanke på service og kundestøtte. [105] Evyon er en ganske ny bedrift på markedet, men har allerede hatt et par pilotprosjekter i 2023 [139].

Evyons batteriskap er mulig å se i figur 8.12. I Evyons datablad er den optimale driftstemperaturen til batterisystemet satt til mellom $10 - 28^{\circ}\text{C}$. Batterikapasiteten varierer for de ulike systemene, og er 121 kWh for en modul med 11 strenger og 165 kWh for en modul med 15 strenger. Effekten er 50 kW per inverter. Kapasitetsgarantien i databladet er satt til 10 år ved DoD på 85 %, mens systemets garanti er på 3 år. Totalvekten til et batteri varierer mellom 800 kg for 11 strenger til 1060 kg for 15 strenger. Størrelsen på et batteriskap er lik uansett antall strenger, sett bort fra høyden. Bredden og lengden er henholdsvis 600 mm og 1000 mm . Høyden varierer mellom 2000 mm for den minste modulen, til 2300 mm for den største modulen. [140]



Figur 8.12: Batteriskap fra Evyon. Bildet er hentet fra evyon.com [141]

Evyon har foreslått to løsninger til Trondheim Katedralskole, begge forslagene er avbildet i figur 8.13. Første løsningen inkluderer tre batteriskap med batterikapasitet på 132 kWh hver, altså et anlegg med 12 strenger. Dette gir totalkapasitet på 396 kWh som er litt større enn Trøndelag fylkeskommune ønsket seg. I tillegg krever en slik installasjon tre invertere, som så gir totaleffekt på 150 kW. Dette er det dobbelte av MOP-kravene. Totalvekten på dette batterisystemet blir på 2580 kg. Det andre forslaget består av to batteriskap på 165 kWh hver, altså et anlegg med 15 strenger. Disse gir en totalkapasitet på 330 kWh som er 20 kWh under MOP-kravene. Denne installasjonen krever to invertere med en totaleffekt på 100 kW. Totalvekten på dette batterisystemet blir på 2120 kg.

◦ 3 x 132 kWh / 396 kWh / 150kW

#	Description	Quantity	Capacity / Effect	Amount
1	Battery Energy Storage 132kWh strings	3	396 kWh	€ 118,800
2	Inverter (REFUstor 50k) - optional	3	150 kW	€ 25,903
3	Energy Management System (EMS) - optional	1		€ 6,050
4	Installation	1		€ 10,000
				€ 160,753

◦ 2 x 165 kWh / 330 kWh / 100 kW

#	Description	Quantity	Capacity / Effect	Amount
1	Battery Energy Storage 165kWh strings	2	330 kWh	€ 99,000
2	Inverter (KACO blueplanet gridsave 50.0 TL3-S Bidirectional battery inverter.) - optional	2	100 kW	€ 13,000
3	Energy Management System (EMS) - optional	1		€ 5,050
4	Installation	1		€ 10,000
				€ 127,050

Figur 8.13: To forslag fra Evyon til batterikonseptet til Trondheim Katedralskole. Bildet er blitt tilsendt fra Evyon av Dag Henriksen

I forslaget til Evyon kommer det frem at det er mulig å bruke en inverter i systemet. Begge alternativer har to ulike invertere. Den ene er *REFUstor 50K inverter*, mens den andre er *KACO blueplanet gridsave 50.0 TL3-S Bidirectional battery inverter*. Begge invertere har maksimal virkningsgrad på 98.5 %. Det er likevel ikke gitt noe miljøprofil til invertere i deres datablader, så det er ikke mulig å si noe om hvorvidt de er miljøvennlige. En REFUstor inverter tar opp areal på 0.216 m² og har høyde på 0.626 m, mens en KACO inverter opptar areal på 0.213 m² med en høyde på 0.760 m. [142, 143] Dette er viktig informasjon til dimensjonering og planlegging av batterirommet.

Evyon har ikke en EPD eller en ferdiggjennomført livssyklusanalyse til batteriene sine, da denne er under utvikling. Det kommer frem i møte med Evyon at deres batterier kan redusere karbonavtrykket med 20 – 100 % sammenlignet med nye litiumionebatterier. En ting som er litt utfordrende med batterier til Evyon er at de i all hovedsak er nye batterier som aldri har vært i bruk i en bil. Bedriften får batterier fra et overskuddslager. Disse anses altså som second life-batterier, uten å direkte være det. Dette kompliserer litt prosessen med LCA. Evyon understreker at de tenker å ta i bruk gjenbrukte batterier etter hvert og ikke minst at livsløpsanalyse er under utarbeiding. Dette kommer frem i møtereferatet i vedlegg F.

8.2.1 Sammenligning av teknologier

Denne delen vil ta for seg sammenligning av nye og gjenbrukte litiumionebatterier og redoks vanadium flytbatterier. Det skal drøftes flere ulike aspekter som leveringssikkerhet, sikkerhetsaspekt, kapasitet, størrelse og ikke minst miljøperspektiv. Disse aspektene skal sammenlignes opp mot hverandre for

de ulike batteriene for å lage grunnlag for diskusjon av hvilke batterityper som egner seg best i dette prosjektet. En oppsummering av sammenlignede parametre er mulig å se i tabell 8.12. Seksjonen under viser mer detaljert sammenligning av de ulike teknologiene.

Tabell 8.12: *Sammenligningsparametre til ulike batteriteknologier*

	Nye LiB	Gjenbrukte LiB	Flytbatterier
Levetid [år]	10-20	10-15	20-25
Energitetthet [kWh/m^3]	80-100	40-50	5.2
Driftstemperatur [$^{\circ}C$]	20-30	20-30	10-30
Areal [m^2]	2.73	1.80	21.00
Høyde [m]	1.96	2.00	1.80
Vekt [kg]	4550	2580	30000
CO_2 utslipp [$kg CO_2 eqv/kWh$]	70-75	17.5-19	-

Leverandører og leveringssikkerhet

Nye litiumionebatterier er per dags dato mest utbredt på markedet da denne teknologien har vært i bruk lengst. Dette fører til at leverandør- og leveringssikkerheten er større enn for de andre batteritypene. Gjenbrukte LiB har ikke vært på markedet like lenge, men ettersom nye LiB er ganske utbredt, gjør det at gjenbrukte batterier også er av høy relevans. Effekten til gjenbrukte batterier som er lovet av leverandørene er noe usikkert, da anleggene ikke har vært lenge nok i bruk til å bekrefte det endelige resultatet. Det er flere leverandører i Norge og i utlandet som jobber med gjenbrukte litiumbatterier, og noen av dem har vært på markedet en stund, slik at de har en leverandørsikkerhet.

Redoks vanadium flytbatterier er et nytt produkt på det norske markedet. Det er noen leverandører på verdensbasis, men kun én som leverer slike batterier i Norge - Bryte. Bryte er en oppstartsbedrift og de har kun hatt to pilotanlegg hittil. Dette begrenser leverandørsikkerheten og ettersom produktet ikke er mye etterprøvd enda, er det ikke gitt at leveringen blir slik den er lovet. Bryte gir likevel en vedlikeholdsavtale, noe som kan tiltrekke seg kunder og øke sikkerheten ved valget av de som leverandør.

Det er noen utfordringer knyttet til ressursforbruk i litiumionebatterier. Det sies at batteriproduksjonen globalt vil øke kraftig de neste årene, og det vil kunne føre til at dagens ressurser brukt i batterier, hovedsakelig litium og kobolt, ikke vil være tilstrekkelige [144]. Dette er foreløpig ikke et problem for vanadium flytbatterier, da oppmot 99 % av elektrolytten kan gjenbrukes.

Sikkerhetsmessige hensyn

Det er sikkerhetskrav knyttet til litiumionebatterier som tilsier at de bør være plassert i en egen branncelle da det er en viss fare for brann og eksplosjon. Dette gjelder både nye og gjenbrukte batterier. Branner og eksplosjoner foregår ikke ofte, men når de først gjør det så er de vanskelig å håndtere. De bør i tillegg ha en ekspansjonssone eller trykkavslansningsflate, altså at en av veggene er litt svakere og kan gi etter i tilfelle eksplosjon. Dette trenger ikke flytbatterier å ha. Ekspansjonssone krever ekstra plass, kostnader og arbeid, og er derfor ikke alltid til å foretrekke.

I Trondheim Katedralskole er batterirommet plassert i en kjeller i Aula-bygget. Dette er ikke en optimal plassering spesielt for litiumionebatterier, da det helst bør være en enkel tilgang til batterirommet - helst på bakkeplan. Plasseringen i kjelleren er en utfordring siden brannvesenet vil slite med å komme seg frem i tilfelle brann. Ikke minst vil en potensiell eksplosjon i en kjeller gå utover store deler av

bygget og eventuelle menneskene som befinner seg der.

En sikkerhetsmessig utfordring ved flytbatterier, som ikke gjelder litiumionebatterier, er pumping av elektrolytten. Bryte kan enten installere fulle tanker som fraktes direkte til installeringsstedet eller så kan de installere tomme tanker og pumpe inn elektrolytten. Grunnet plasseringen av batterirommet på Trondheim Katedralskole, må elektrolytten pumpes. Dette utgjør en fare da det må etableres en sikkerhetsbarriere under pumping, og søl bør unngås. I tillegg er det ingen direkte kobling mellom batterirommet og uteområdet, noe som krever lange rør og potensielt øker faren for lekkasje.

Alle batterisystemene bør ha et meget godt ventilasjonsanlegg, da de alle utvikler varme under bruk. LiB, nye og gjenbrukte, bør ha et ventilasjonsanlegg som er separert fra ventilasjonen i resten av bygget da gassene som befinner seg i batteriene er meget giftige. Flytbatterier har hydrogengass i seg, men det skal ikke være mulighet for lekkasje, påpeker Head of Growth i Bryte i møte i vedlegg D. De kan derimot lekke elektrolytt - vanadium - som er svært giftig og ikke bør komme ned i avløpet [105]. Alle systemer bør i tillegg ha god avstand rundt seg, da det må være lufting. Optimal temperatur for litiumbatterier er på $20 - 30^{\circ}\text{C}$, mens flytbatterier $10 - 30^{\circ}\text{C}$, så det er ingen av disse systemene som er særlig mer krevende enn andre når det gjelder temperaturstyring i rommet.

Batteriparametre

LiB er best av alle alternativer på energitetthet, da nye litiumbatterier har energitetthet på mellom 80 og 100 kWh/m^3 . Gjenbrukte LiB har vanligvis halvert energitetthet i forhold til nye, altså på mellom 40 og 50 kWh/m^3 . [105] Dette er ikke tilfellet med Evyons sine gjenbrukte batterier, da de egentlig er nye batterier hentet fra overskuddslageret til Mercedes. Disse batteriene har dermed aldri vært i en bil og blir solgt videre til Evyon, da batteriets ytelse blir forverret dersom de ikke brukes. Disse blir lite egnet til å bruke i bil, men vil likevel egne seg til stasjonær energilagring. Dette påpekes i møte med Evyon i vedlegg F. En må da ta høyde for at dersom man velger en annen leverandør så vil det måtte regnes med å bruke større areal på gjenbrukte batterier, grunnet lavere energitetthet. Det er dermed flytbatterier som kommer verst ut, da de har betydelig lavere energitetthet. VisBlue oppgir energitettheten til sine batterier til 5.2 kWh/m^3 [105].

Det er mulig å oppnå samme batterikapasitet på alle batterier, men det krever ulike systemer av ulik størrelse og effekt. Arealmessig skal nye LiB være det alternativet som opptar minst plass, og flytbatterier vil være det alternativet som opptar aller mest plass. Litiumbatterier krever lite direkte vedlikehold, da de har sensorer som kan måle avvik og koble systemet ut [105]. Disse sensorene har likevel utviklingspotensiale. Noen ganger reagerer de ikke raskt nok og feil på systemet kan føre til brannfare. Dette understreker Evyons representant i vedlegg F. Flytbatterier har også sensorer som informerer om eventuelle feil. I tillegg anbefaler selskapet Bryte årlig vedlikehold på anleggene sine, understrekker Brytes representant i møte i vedlegg D. Både nye og gjenbrukte litiumbatterier kan levere en betydelig høyere effekt enn vanadium flytbatterier, samt kan lades opp igjen betydelig raskere. [105]

Når det gjelder levetid så er det noe usikkerhet knyttet til hvorvidt tallene er pålitelige. I utgangspunktet er det flytbatterier som har lengst levetid på 20-25 år eller 20000 sykler. Levetiden på nye og gjenbrukte (Evyons) litiumbatterier er på henholdsvis 10-20 år eller 6000 sykler og 10-15 år eller 6000 sykler. Nye litiumbatterier tar utgangspunkt i ett tall som er etterprøvd og dermed ganske sikkert, selv om det oppgis med stor variasjon. Når det gjelder gjenbrukte batterier så vil levetiden avhenge av leverandøren. Ettersom Evyon leverer gjenbrukte batterier som kommer fra overskuddslageret, vil deres levetid avvike fra levetiden til gjenbrukte batterier som faktisk har blitt brukt i en elbil tidligere. Flytbatterier er meget nye på markedet og ingen av systemene har vært i bruk lenge nok til å bekrefte om levetid på 20000 sykler er mulig å oppnå.

Størrelse og plassering

For nye litiumionebatterier blir det tatt utgangspunkt i LFP-batterier. Anlegget består av 7 batteriskap og krever et areal på 2.73 m^2 . Høyden på et slikt anlegg er 1.964 m . Vekten på anlegget er på mellom $3850 - 4550 \text{ kg}$. Gjenbrukte NCM litiumbatterier fra Evyon krever et areal på 1.8 m^2 dersom en tar utgangspunkt i det større systemet med 3 strenger, med en høyde på 2.0 m . Systemet med 3 batteriskap er litt overdimensjonert, men det tilfredstiller MOP-krav, så av den grunn er det å foretrekke. I tillegg er anlegget med 2 batteriskap 0.3 m høyere enn det med 3, og det vil begrense lufting rundt batteriet. Anlegget har en vekt på 2580 kg . Flytbatterier krever et areal på 21 m^2 dersom en antar å bruke 8 stykk. Høyden til et slikt anlegg er på 1.8 m og vekten er 30000 kg .

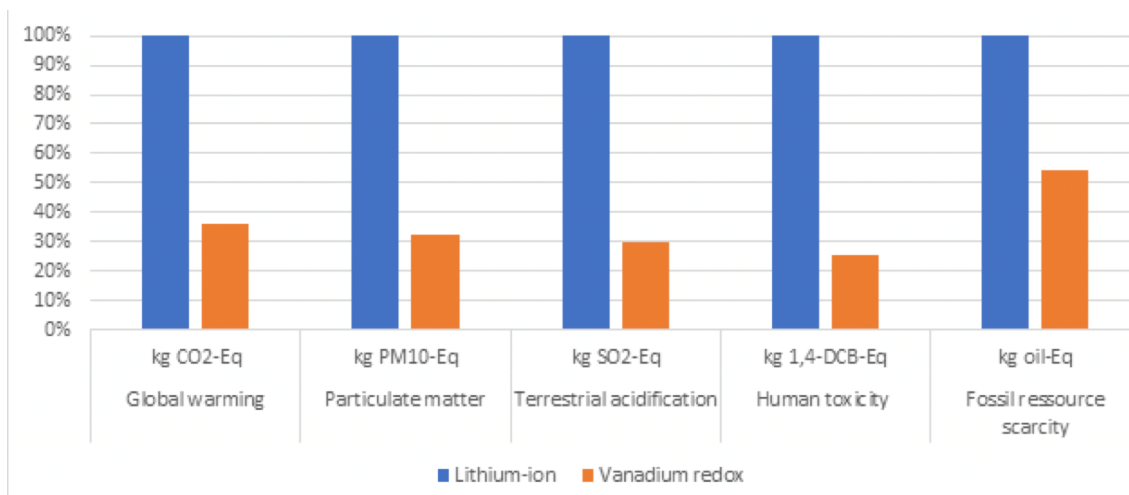
Det er i tillegg viktig å sette av minst 0.6 m foran hvert flytbatteri, da Bryte stiller det som krav. Det er ingen slike konkrete krav som ble funnet i databladet til litiumionebatteriene, men grunnet fare for overheting bør de også dimensjoneres med mellomrom for lufting. Det er i tillegg viktig å ta hensyn til inverttere. Disse tar som regel ikke mye plass, men bør dimensjoneres for, ettersom de er nødvendige til å drifte systemet.

Til slutt er det viktig å påpeke en stor utfordring i batterirommet på Trondheim Katedralskole, nemlig takhøyden. Takhøyden varierer mellom $2.0 - 2.5 \text{ m}$ grunnet skråtak. Det laveste punktet er ikke hensiktsmessig med tanke på noen av batteriene, da de bør ha god lufting rundt hele batteriet. Dette er muligens størst utfordring for litiumbatterier som er tilnærmet 2 m høye, men det er også knapt for flytbatterier som har høyde på 1.8 m . Totalarealet på batterirommet er på 23.1 m . Dette er tilstrekkelig for litiumbatteriløsninger, men knapt for løsningen med flytbatterier.

Miljø - karbonfotavtrykk

Gjenbrukte LiB kommer godt ut på miljøperspektivet da de ikke har utslipp tilknyttet utvinningen av produkter og produksjonen, kun ombygging. I tillegg blir den totale batterilevetiden forlenget med omtrent 10 år. Røft estimat i følge Sintef Energi er at gjenbrukte LiB har karbonfotavtrykket tilsvarende 25% av nye litiumbatterier. Klimafotavtrykket fra nye LiB er på cirka $70 - 75 \text{ kg CO}_2 \text{ eqv/kWh}$. Det vil si at det er omtrent $17.5 - 19.0 \text{ kg CO}_2 \text{ eqv/kWh}$ for gjenbrukte LiB. [105] Flytbatterier har tilsvarende fotavtrykk på 10.855 kg CO_2 per batteri. Dette blir redusert med hele 77% dersom elektrolytten er gjenbrukt. [115] Disse tallene er hentet fra LCA til VisBlue sine batterier, og det er ikke spesifisert hvorvidt det er snakk om 40 eller 50 kWh batteri. Av den grunn er ikke dette tallet nok grunnlag for sammenligning.

Bedriften VisBlue har utført en sammenligning av nye litiumionebatterier og vanadiumbaserte flytbatterier og det er mulig å se i figur 8.14. Denne analysen har blitt gjennomført basert på standardene ISO 14040 og 14044. Disse standardene er anerkjent internasjonalt som den beste praksisen for miljøvurdering. Parameterene som er brukt til å måle den relative påvirkningen fra et vanadium flytbatteri sammenlignet med et litiumbatteri er: global oppvarming, partikulært materiale, forurensing på land, menneskelig toksisitet og fossil ressursknapphet. Hver enkelt parameter er sammenlignet for de to batteriene. Totalt sett viser resultatet fra denne analysen at redoks flytbatteriene til VisBlue er mer bærekraftige enn et litiumbatteri. [115] Likevel viser en publisasjon i Environmental Science & Technology fra 2015, som har gjort analyser av blant annet LiB og vanadium flytbatterier, at karbonfotavtrykket fra begge batterityper er tilsvarende. Hovedgrunnen til dette er at utvinning av elektrolytten - vanadium - er svært energikrevende. [145]



Figur 8.14: *Utslippssammenligning i mellom flytbatterier og nye litiumionebatterier, hentet fra Bryte [115]*

Sammenlignet med nye litiumbatterier skiller vanadium flytbatterier seg ut når det kommer til bærekraft. Oppmot 99 % av elektrolytten kan bli gjenbrukt. Dette reduserer mengden nytt vanadium som må utvinnes og behandles, og det forlenger batteriets levetid. [115] Utslippene fra utvinningen av vanadium vil derfor ikke bli like store i hele miljøregnskapet ved gjenbrukt elektrolytt [105]. Litiumbatterier er vanskeligere å resirkulere da det ikke er blitt forsket så mye på enda. Det jobbes for tiden likevel med å utvikle resirkuleringsmuligheter for å unngå miljøforurensning fra denne type batteri. [146]

8.3 Strategier for energilagring

Strømnettet utsettes for større og mer effektkrevende laster enn før. Dette er på grunn av endrede bruksmønstre hos forbrukere. Ved å ta i bruk batterier kan det oppnås en jevnere effektflyt i strømnettet. Batterier vil bidra med å kutte effekttopper. Da blir forbruket blir jevnere og nettet unngår overbelastning. Strømnettet skal sikre en konstant kraftforsyning, samt håndtere variasjon i både forbruk og innmating. Det er Statnett SF som eier størstedelen av transmisjonsnettet i Norge og er systemansvarlig i det norske kraftsystemet. Systemansvarlige skal som sørger for frekvensregulering og sikre at kraftsystemet er balansert. Dette oppnås med opsjonsmarkedet RKOM hvor sluttbrukere for betalt om de garanterer å delta i reguleringskraftmarkedet. Om denne løsningen skal benyttes må batterisystemet potensielt ta hensyn til diverse tilleggskrav som kan føre til ekstra kostnader, utbyggelse og anskaffelse av avanserte systemer. [105]

Et av hovedpoengene med batterisystemet er å kutte effekttopper på vinterhalvåret. Da må det angis en grenseverdi. Dette er grensen som settes for når batteriet skal levere strøm. Det vil si at om effektbehovet til skolen overstiger den satte grenseverdien kobles batteriet automatisk inn og leverer strøm. På den måten kuttet effekttoppene og de blir ikke høyere enn grenseverdien. Det er viktig å finne riktig grenseverdi slik at batteriet kan kutte nødvendige effekttopper før det lades helt ut. Om grenseverdien er for lav vil batteriet levere mye mer energi per effekttopp og utlades mye fortere. Grenseverdien bør bestemmes for hver enkelt måned utifra forventet produksjon fra solceller og energibehovet til skolen. [105]

En av utfordringene i dette prosjektet er at energiproduksjonen fra solceller vil være størst om sommeren når energibehovet er minst, og minst om vinteren når energibehovet er størst. Det vil derfor være et underskudd av produsert energi på vinteren og et overskudd på sommeren. Derfor bør batte-

riety styres etter to hovedmodus for optimal energilagring. Det ene er vintermodus. Da skal batteriet lagre strøm fra nettet på natta som skal benyttes til å redusere effekttoppene på dagen, når behovet er størst. Det andre er sommermodus. Da skal batteriet lagre overskuddsstrøm fra solcellene på dagen som skal selges på ettermiddag og kveld eller benyttes på dager med lite sol. En avansert energilagring løsning som dette vil kreve avanserte kontroll- og styringsystemer som kan tilpasse seg avhengig av døgn- og sesongvariasjoner, forutse værmeldingen samt strømpris. Batteriet bør kommunisere med byggets SD-system for at bygget skal bruke den produserte strømmen så effektivt og smart som mulig. [105]

I vinterperioden vil solcellene ha en mindre produksjon og derfor et underskudd av strøm. Da må det kjøpes strøm fra nettet. Behovet for energi kan være betydelig større enn produsert strøm fra solcellene og dette fører til høye effekttopper. Disse effekttoppene kan kuttes ved å kjøpe strøm fra nettet når behovet er minst og strømmen er billigst, for så å benytte denne energien på dagen når behovet er størst og strømmen er dyrest. I møtet med Dag Henriksen i vedlegg F nevner han at det er hensiktsmessig for batterier å bli brukt til å lagre energi fra nettet, for de har ikke godt av å ikke lade i perioden uten sol. I sommerperioden vil det være et overskudd av produsert strøm som kan selges til nettet. Dette begrenses av plusskundeordningen. Det kan ikke selges mer enn 100 kW strøm til nettet uten å betale innmatingstariff. Derfor vil det lønne seg å lagre deler av overskuddsproduksjonen. Da kan den tas i bruk senere eller selges til nettet senere på dagen. Ved å ha værmeldingen implementert i styringstrategien kan salg/bruk tilpasses neste dags behov. Om det er meldt regn eller overskyet er det mer gunstig å bruke den lagrede energien til å redusere effekttopper neste dag enn å selge den på ettermiddagen/kvelden. [105]

Ved å ikke styre batteriet etter to hovedmodus vil mye produsert energi gå tapt. Om sommeren vil det ikke være nødvendig for batteriet å lagre energi fra nettet om kvelden når prisen er lavest, for da vil ikke batteriet ha kapasitet til å lagre overproduksjonen på dagtid. Dette fører til at mye større andel av den produserte strømmen fra solcellene må strupes. Om vinteren vil det ikke være nødvendig for batteriet å selge energi til strømmettet. Det vil være en underproduksjon av strøm og alt bør gå til drift av skolen. Derfor er det lurt å tilpasse batteriet etter årstidene. På våren og høsten kan det være nyttig å variere mellom sommer- og vintermodus i enkelte perioder. Det vil også lønne seg å ha mer dynamiske grenseverdier for effekttoppkutting, da det vil være større variasjon innad i en måned. En mer dynamisk bruk av batterier vil være mulig med en god styringsmodell hvor byggets SD-system får informasjon om vær, temperatur og beregnet energi- og effektbehov. [105]

I dette prosjektet er det ZEB som er i fokus og valget av løsning skal være mest miljøvennlig og bærekraftig. Selv om batteriet optimaliseres vil det likevel ikke ha en påvirkning på om nybyggene når ZEB-O kravene. I møtet med Dag Henriksen i vedlegg F nevnte han at strømmettet i Norge kan være mer optimalt å bruke enn batterier, siden det meste av elektrisiteten kommer fra fornybare energikilder. I det egentlige prosjektet brukes det den europeiske kraftmiksen. Denne har mye høyere utslipp av $g\ CO_2\ eq/kWh$ og dermed også lavere fornybar andel enn den norske [147]. Dette gjøres for at byggene i dette prosjektet skal være mulig å sammenligne med andre nullutslippsbygg i Europa. I gruppens sammenligningsdel brukes likevel den norske energimiksen. Når det gjelder batterier, påpeker Henriksen at de heller ikke er så økonomiske, nettet er ofte billigere å bruke til lagring. Det positive bidraget fra batteriet er at man kan unngå eller utsette utbygging av strømmettet. Utbygging av strømmettet er meget kostbart og tar lang tid, så her er det en økonomisk besparelse ved bruk av batterier.

8.4 Andre forslag til prosjektet

Hovedfokuset for denne rapporten er å bidra til ZEB-O ved at solcelleproduksjon med energilagring når nullutslipp. Dette delkapitlet skal kort nevne andre innspill som kan gi Trondheim Katedralskole

en enda høyere miljøprofil. Det vil også ta for seg noen andre muligheter til solcelleløsninger på fasaden som kan bidra til et bedret historisk inntrykk.

8.4.1 Fjernvarme vs varmepumpe

Som nevnt i delkapittel 3.2 har fjernvarmenettet i Trondheim en fornybarandel på 88.7 % og et utslipp på 46.3 g CO_2 eq/kWh [58]. Dette viser at Trondheim Katedralskole har et potensial til å nå en høyere miljøprofil ved å bytte ut fjernvarme med et energisystem med høyere fornybarandel. Strømmen i Norge har større fornybarandel enn fjernvarmen i Trondheim, altså 98 %, og slipper ut 11 g CO_2 eq/kWh [148]. Trondheim Katedralskole kunne altså bidratt med mindre utslipp dersom samme andel energi fra fjernvarme ble byttet ut med samme andel energi i form av elektrisitet. Som vist i tabell 3.2 leverer fjernvarme 18690 kWh/år. Ved beregninger vil dette tilsvare 865.3 kg CO_2 eq per år ved bruk av fjernvarme. Dersom fjernvarmenettet blir byttet ut med elektrisitet vil det kun bidra til å redusere dette til 205.6 kg CO_2 eq per år og mindre dersom elektrisiteten stammer fra solcellene som skal installeres.

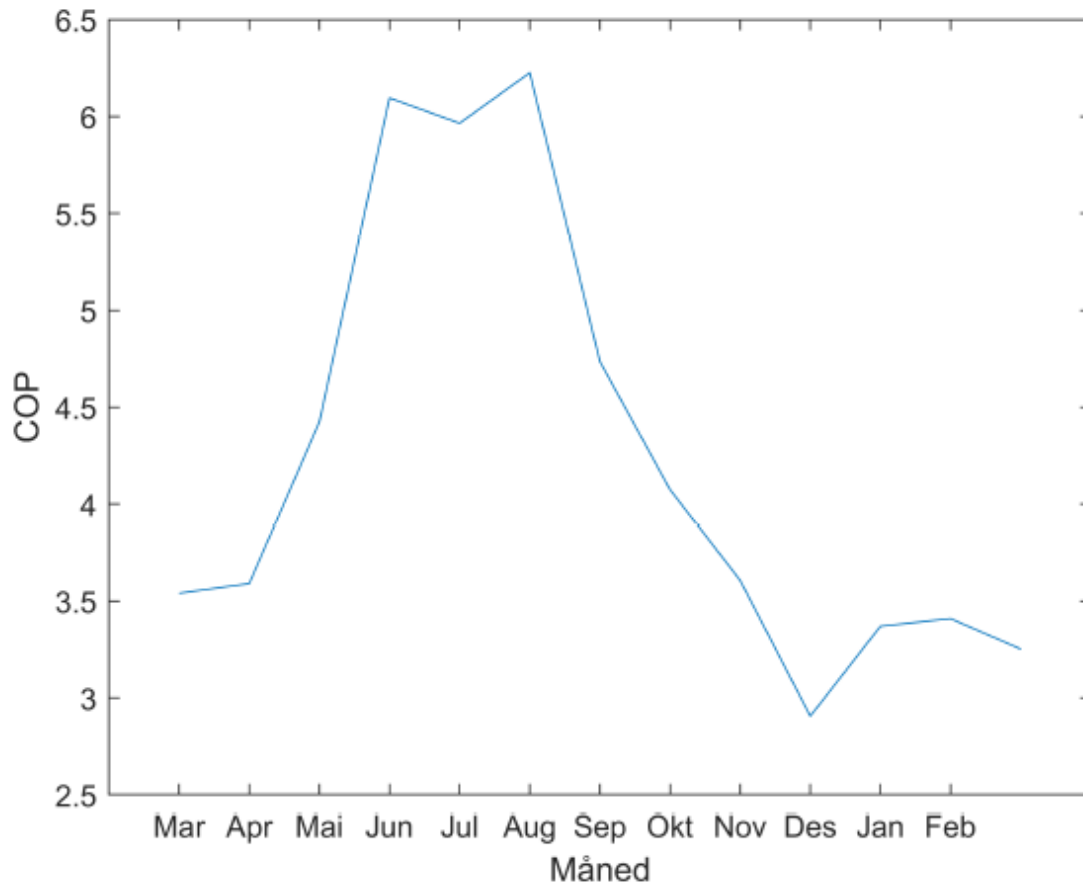
Økonomisk sett er energien fra fjernvarme billigere enn elektrisitet. Dette er grunnet energilov § 5 – 5 som sier ”Vederlag for fjernvarme kan beregnes i form av tilknytningsavgift, fast årlig avgift og pris for bruk av varme. Prisen for fjernvarme skal ikke overstige prisen for elektrisk oppvarming i vedkommende forsyningsområde.” [149]. Samtidig er de gamle byggene til Trondheim Katedralskole allerede koblet til fjernvarme og det kan være billigere å beholde det enn å fjerne fjernvarmenettet eller erstatte det med nye energikilder.

Fjernvarme bidrar til en sirkulær økonomi og grønn områdeutvikling ved at andre ressurser som for eksempel spillvarme blir gjenbrukt. Videre vil fjernvarme bidra til forsyningssikkerhet og til å avlaste strømmenettet ved høye effekttopper. Fjernvarmenettet bidrar altså til en økt miljøprofil i samfunnet selv om klimagassregnskapet for et bygg blir høyere. Hovedfokus til prosjektet på Trondheim Katedralskole er å bidra til lavest mulig utslipp ved ZEB og dermed er ikke fjernvarme optimalt, ettersom at andre energisystem må kompensere for utslippet til fjernvarmen. [150]

Deler av oppvarmingsbehovet i Katedralskole skal dekkes av varmepumper. Gruppen ser på det som mer nyttig for energiberegningene dersom energien som dekkes av fjernvarmen hadde vært dekket av varmepumper i stedet. Under møte med Dag L. Henriksen fra Evyon, se vedlegg F, ble en varmepumpe fra Neotemp anbefalt. Varmepumpen blir kalt Annex 03-H/C og er av Neotemp beskrevet som: ”Her er verdens mest energieffektive luft til vann varmepumpe, levert i en bærekraftig plug & play containerløsning.” [151]. Varmepumpen har en SCOP-årsvarmefaktor på 5 og det vil si at varmepumpen bruker 1 kW for å avgi 5 kW varme [151]. Dette betyr at dersom varmepumpen skulle dekket tappevannsbehovet til Trondheim Katedralskole som er oppvarmet av fjernvarme ville den bare brukt 18690/5 kWh elektrisitet, altså 3738 kWh. Dette ville tilsvart 41.2 kg CO_2 eq-utslipp i året, som er mye lavere enn utslippet fra fjernvarme.

COP er effektfaktor, også kalt varmefaktor og denne viser en øyeblikksverdi av varmeeffekten som blir produsert av varmepumpen. Graf 8.15 viser COP-faktoren til varmepumpen gjennom året. Grafen viser hvordan COP-faktoren er høyest om sommeren når temperaturene er høyest og skolen blir brukt minst. Gjennomsnittet for COP-verdien lå på 4.2 og dette viser at varmepumpen kan bruke litt mer elektrisitet enn 3738 kWh som var beregnet tidligere.

Beregningene gjort for å lage grafen er vist i vedlegg G. Ved disse beregningene er det gjort to antagelser der den ene er at varmepumpen bare blir brukt til oppvarming og den andre er at temperatur ved utgang er 45° C. Beregningene er gjort ved interpolering av gjennomsnittstemperaturene i Trondheim og COP-verdien for forskjellige temperaturer for Annex 03-H/C.



Figur 8.15: *Figuren viser COP verdier gjennom året for Annex 03-H/C. Bildet er laget i MATLAB, se vedlegg G*

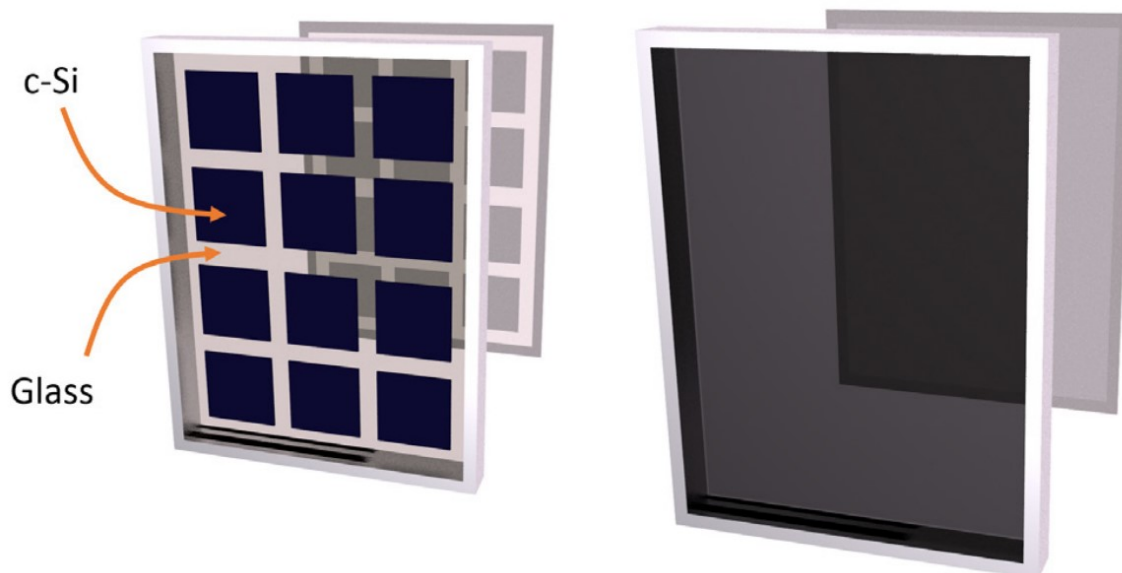
8.4.2 Alternative fasadeløsninger

Solceller er meget relevante i det grønne skiftet og av den grunn er de hele tiden under utvikling [152]. Det kommer nye løsninger på markedet stadig vekk og derfor skal det her presenteres alternative løsninger som en kunne ha vurdert i dette prosjektet. Fokuset vil være på alternative fasadeløsninger. Fagsjef for bærekraftige bygg i Trøndelag fylkeskommune - Torger Mjønes - påpeker at det i dette prosjektet er viktig å sørge for at historien møter fremtid. Med det menes det at solcelleløsninger - som er et moderne element - passer godt med utseende og historie til de eldre byggene. Dette kommer frem i møtereferatet i vedlegg A. Likevel tilsier kravspesifikasjoner at solceller på fasaden og taket bør være av samme fabrikat og modell. Dette begrenser friheten i valg av fasadeløsninger i denne oppgaven.

Dersom en skulle sett bort ifra dette elementet, kan en vurdere å se på flere løsninger som blant annet Semi-Transparent PV (STPV) og Double-Skin Facade (DSF). Dette er noen av løsningene som ble anbefalt av førsteamanuensis fra instituttet for bygg- og miljøteknikk ved NTNU i Trondheim - Gabriele Lobaccaro. Det kommer frem i møtereferatet i vedlegg E. Lobaccaro understrekte at det er mange teknologier som det fortsatt forskes på for å lage mer effektive og anvendte solceller. Ulike pilotprosjekter er satt i gang for å finne eventuelle utfordringer med nye anlegg. En oversikt over noen av disse er mulig å finne i rapporten Task 51 [153].

STPV - Semi-Transparent PV

En ny løsning som er mulig å implementere på fasaden er semi-transparente eller semi-opaque solceller som er mulig å se i figur 8.16. Dette er solceller som er innebygd i glass. Slike solceller kan monteres i vinduer, glasstak eller i rekkverket. Denne teknologien er av typen BIPV - bygningsintegrerte solceller - med den fordelen at den slipper lys inn i bygget samtidig som den genererer strøm [154].



Figur 8.16: Figuren til venstre viser semi-opaque solceller, mens figuren til høyre viser semi-transparente solceller og er hentet fra IOPscience [154]

En slik solcelleløsning kunne bli valgt å implementere på blant annet glassbroen i mellom Moe-byggene og Midtbygget, i tillegg til de allerede planlagte solcellene på fasaden. Ikke minst kunne slike solceller erstatte vinduer på den sørlige og østlige fasaden på Midtbygget, for å øke den totale produksjonen. En fordel med slike solceller er at de kan integreres med omgivelsene uten at dette går på betraktning av det historiske aspektet, da en kan velge blant et bredt fargespekter av disse solcellene.

DSF - Double Skin Facade

Double skin fasade (DSF) er, som navnet tilsier, en dobbel fasade. Det implementeres altså en ekstra bygningsfasade, atskilt med en luftspalte, ovenfor en allerede eksisterende fasade [155]. DSF kan kombineres med solcelleløsninger, slik at man får et BIPV system på det ytterste skallet. Et slikt system kan installeres i form av STPV, altså semi-transparente solceller. På den måten sørger man for å få dagslys inn i bygget, samtidig som det produseres energi. DSF i kombinasjon med solceller øker ikke den totale produksjonen, men bidrar positivt til bygget på andre måter. Den har en positiv effekt på ventilasjon, støyreduksjon og fører til forbedring av termisk komfort. [155]

Et eksempelbilde på en DSF løsning er mulig å se i figur 8.17.



Figur 8.17: *Figuren viser et eksempel på en Double skin fasade (DSF) løsning og er hentet fra artikkelen Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs) fra Science Direct [155]*

Double skin fasade (DSF) løsninger er spesielt nyttige for eldre bygg der man ikke vil ødelegge den gamle fasaden, men det anvendes også veldig ofte i nybygg, påpeker førsteamanuensis Gabriele Lobaccaro i vedlegg E. Dette kan være en passende fasadeløsning til Midtbygget for å få frem det gammeldagse utseende på fasaden uten å implementere synlige solcellepaneler. Likevel kan det diskuteres hvorvidt det er fasadeutseende som bevares, eller om det er nettopp det som blir dekket av DSF og det som gjør at bygget får et moderne preg. Denne løsningen kan også vurderes på glassbroen. På grunn av at nesten hele broen blir laget av glass, kunne en DSF løsning sikre termisk komfort i denne delen av bygget, samt bidra som tilleggsbeskyttelse mot vindkast og regn.

8.4.3 Termisk energilagring

Varmebehovet til Trondheim Katedralskole dekkes av fjernvarme i kombinasjon med varmepumper. Når store mengder termisk energi skal hentes fra fjernvarmenettet vil det bli en høy toppplast. Denne kan kuttes ved å implementere termisk energilagring i form av PCM. Ved å installere et PCM-varmelager kan termisk energi lagres på natten når det er lavt varmebehov i bygget, og deretter brukes på dagen når det er stort behov for varme. På denne måten reduseres effekttoppene i fjernvarmenettet. I tillegg

kan noe av overskuddsproduksjonen fra solcellene lagres i form av varme ved bruk av varmepumpe og PCM. Noen typer PCM er basert på biomateriale, noe som gjør at den er resirkulerbar og mer miljøvennlig enn elektrokjemiske batterier. Den forventede levetiden til lageret er på 20-25 år og den er vedlikeholdsfri. [105]

Daglig vil det være en variasjon i energibehov for kjøling og oppvarming. Dette resulterer i at varme- og kjølesystemer må overdimensjoneres for å kunne håndtere de høyeste lastene. Med termisk energilagring vil topplasten kuttes og det blir ikke nødvendig å overdimensjonere. I tillegg blir energien som hentes fra nettet bedre utnyttet og varmetapet blir mindre. Likevel er implementering av et termisk energilagring en stor investering og dette kan være en utfordring. På dette tidspunktet finnes det ikke en leverandør av PCM-termisk energilagring i Norge. [105]

Termisk energilagring vil bidra med å oppnå ZEB-O kravene ved å redusere klimagassutslippene fra driften av skolen gjennom økt utnyttelse lokalprodusert energi. Det vil også bidra med å redusere effektbehovet gjennom en mer fleksibel styring av energistrømmer innad i skolens energisystem, i tillegg til omliggende energisystem. I møtet med Torger Mjønes fra fylkeskommunen i vedlegg A forteller han at termisk energi kan deles med nabobygg uten avgifter, i motsetning til elektrisk energi. Derfor er det en effektiv løsning hvor lite energi går tapt.

9 Resultater

Denne delen innhenter all nødvendig data fra teori og forskning for å kunne gjøre videre beregninger i PVSyst. Det blir utarbeidet ulike scenarioer for solcelleanlegg som kan oppnå ZEB-O. De resultatene som oppnår ZEB-O krav skal danne et sammenligningsgrunnlag videre inn i oppgaven. Elektrisk energilagring skal også sammenlignes.

9.1 Energiproduksjon

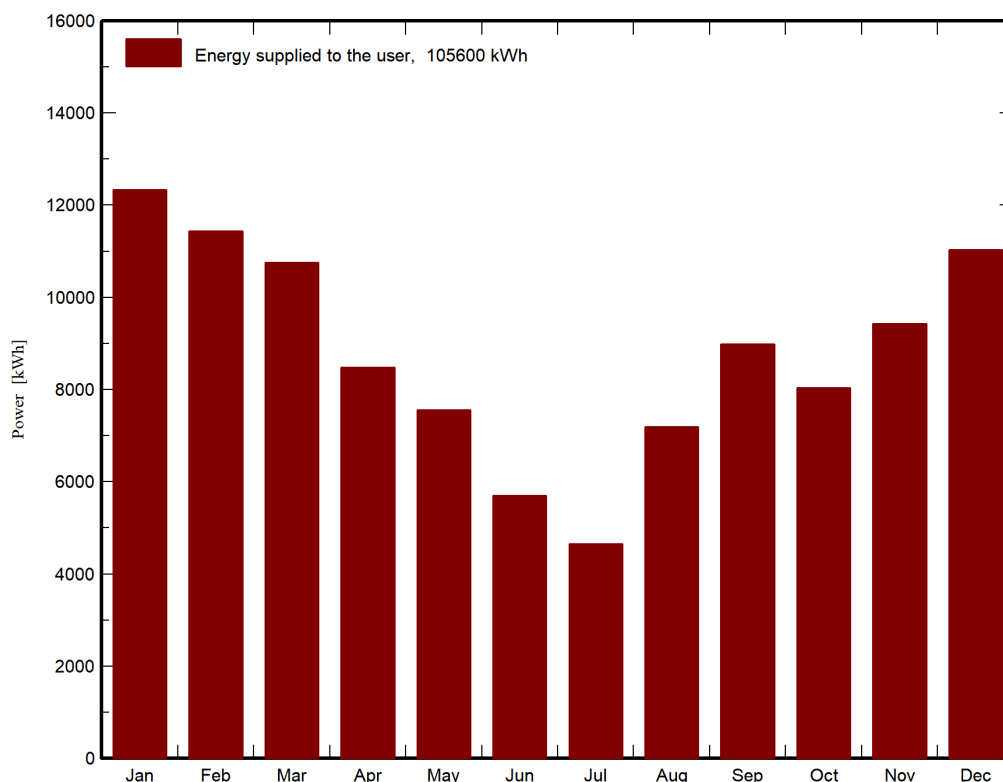
Ønsket resultat fra solcelleproduksjon ligger på 105600 kWh/år for å kunne nå ZEB-O krav. Denne delen vil gi ulike resultater som er beregnet i PVSyst som kan nå kravet om 105600 kWh/år. Dette vil først bli inndelt i ulike beregninger gjort i PVSyst og deretter vil det komme frem til 4 scenarioer med resultater i form av grafer og tabeller.

9.1.1 Månedsverdier

For å gjøre beregninger over energiproduksjon med batterier i PVSyst trenger man verdier for energiforbruk. Tabell 9.1 viser en oversikt over strømforbruket fra tidligere år og beregnet elektrisk forbruk som må dekkes av solceller. Det årlige beregnede strømforbruket blir også presentert i graf 9.1. Her ser en at forbruket er høyest i vinterhalvåret og lavest om sommeren.

Tabell 9.1: Årlig strømforbruk for Trondheim Katedralskole gitt av Rambøll og beregnet elektrisk strømforbruk som skal dekkes av solceller.

	2020 [kWh]	2021 [kWh]	2022 [kWh]	2022 [kWh]	Beregnet forbruk [kWh]
Januar	83 871	96 129	88 889	88 889	12338
Februar	163 998	180 105	171 295	82 406	11438
Mars	236 645	256 803	248 784	77 489	10756
April	291 376	323 875	309 875	61 091	8480
Mai	347 078	376 552	364 364	54 489	7563
Juni	385 574	416 652	405 454	41 090	5703
Juli	419 927	453 035	438 958	33 504	4650
August	458 279	496 190	490 736	51 778	7187
September	507 118	548 877	555 461	64 725	8984
Oktober	565 483	610 664	613 331	57 870	8033
November	636 008	691 102	681 279	67 948	9431
Desember	713 343	778 006	760 791	79 512	11036
Totalt				760 791	105600



Figur 9.1: Figuren viser energiforbruk gjennom året og er hentet fra PVSyst

9.1.2 Produksjon

Videre er det gjort beregninger i PVSyst for solcelleanlegg med Series 6 og med Maxeon 3. Fasadeberegninger tar utgangspunkt i sør- og østfasade. I tillegg er det gjennomført beregninger for tak med 1 m avstand og 3 m avstand. Det tas også hensyn til anlegg med og uten batterier. Simuleringene med batterier bruker alle samme type batteri.

Det skal være solceller på tak og på fasade dersom det er et behov. En PVSyst simulering kan ikke vise de sammenlagte resultatene for forskjellige flater på et bygg. Grunnet dette er det valgt å starte med å se på fasaderesultatene alene først. Resultatet for fasadeberegninger er vist i tabell 9.2. Tabellen viser at produksjonen på fasade med Series 6 ligger på 24286 kWh/år og produksjonen fra Maxeon 3 på fasade ligger på 27622 kWh/år. På fasadeberegninger er det ikke simulert med batterier grunnet at batterisystemet skal være koblet til hele solcelleanlegget. Produksjonen fra solceller på fasaden er lav, og det velges derfor å sette batteriene kun på takberegninger ettersom at taket produserer mest.

Tabell 9.2: Produksjon fra fasader uten batterier

Fasade og moduler	Moduler	Effekt [kWp]	Produksjon [kWh/år]
Fasade sør, Series 6	54	24.3	14447
Fasade øst, Series 6	26	11.7	9839
Fasade sør, Maxeon 3	66	26.4	16216
Fasade øst, Maxeon 3	33	13.2	11406

Det er gjort beregninger for tak alene for å se om det kan nå ZEB-O krav uten bruk av solceller på fasade. Tabell 9.3 viser produksjonen fra taket med bruk av batterier. Her vil kun solcelleanlegg med

Maxeon 3 og takavstand på 1 m oppnå ZEB-O krav. Tabell 9.4 viser produksjonen fra taket uten bruk av batterier. Her vil både solcelleanlegget med Series 6 og Maxeon 3 med 1 m avstand oppnå ZEB-O krav. Dersom det skal være solcelleproduksjon på tak uten fasadeløsninger vil ikke avstanden på 3 m nå ZEB-O krav for hverken Maxeon 3 eller Series 6.

Tabell 9.3: *Produksjon fra tak med batterier*

Modul og avstand fra kant	Antall moduler	Effekt [kWp]	Produksjon [kWh/år]
Series 6, 3 m	213	95.6	59064
Series 6, 1 m	340	153	99200
Maxeon 3, 3 m	304	122	76243
Maxeon 3, 1 m	486	194	129894

Tabell 9.4: *Produksjon fra tak uten batterier*

Modul og avstand fra kant	Antall moduler	Effekt [kWp]	Produksjon [kWh/år]
Series 6, 3 m	213	95.6	74863
Series 6, 1 m	340	153	117036
Maxeon 3, 3 m	304	122	95825
Maxeon 3, 1 m	484	194	148345

Videre er det gjort beregninger med solcelleanlegg på tak og fasade. Beregningene for tak og fasade uten batterier ble gjort ved å legge sammen verdiene fra solcelleproduksjon på tak uten batterier med solcelleproduksjon på fasade uten batterier. Tabell 9.5 viser resultatene fra tak og fasade uten batterier. Her er det bare solcelleanlegget med Series 6 og 3 m avstand fra takkant som ikke når ZEB-O krav. Det samme gjelder for tak og fasade med batterier som vist i tabell 9.6. Resultater for tak og fasade med batterier kan avvike fra virkelig produksjon ettersom at det ikke var mulig å legge sammen tak og fasade i en PVSyst simulering. For å forenkle beregningene ble nominell effekt fra tak og fasade addert og det er ikke lagt til vinkler fra fasader. Dette kan gjøre at estimert produksjon gjennom året avviker grunnet at det viser produksjon hvor nominell effekt bare gjelder for tak.

Tabell 9.5: *Produksjon fra tak og fasade uten batterier*

Modul og avstand fra kant	Antall moduler	Effekt [kWp]	Produksjon [kWh/år]
Series 6, 3 m	293	131.6	99149
Series 6, 1 m	420	189	141322
Maxeon 3, 3 m	403	161.6	123447
Maxeon 3, 1 m	583	233.6	175967

Tabell 9.6: *Produksjon fra tak og fasade med batterier*

Modul og avstand fra kant	Antall moduler	Effekt [kWp]	Produksjon [kWh/år]
Series 6, 3 m	292	131	83957
Series 6, 1 m	420	189	125954
Maxeon 3, 3 m	405	162	106660
Maxeon 3, 1 m	584	234	153345

9.1.3 Scenarier

For videre scenaribyggning er det valgt å ta vekk alt med årsproduksjon under 105600 kWh/år . Det er også valgt å ta vekk alt av produksjon uten batterier ettersom at MOP stiller krav til å ha med batterier. Under vises scenarier for diskusjonsgrunnlag og resultater:

1. Maxeon 3 på tak med 1 m avstand fra takkant uten solceller på fasade.
2. Series 6 på tak med 1 m avstand fra takkant med solceller på fasade.
3. Maxeon 3 på tak med 3 m avstand fra takkant med solceller på fasade.
4. Maxeon 3 på tak med 1 m avstand fra takkant med solceller på fasade.

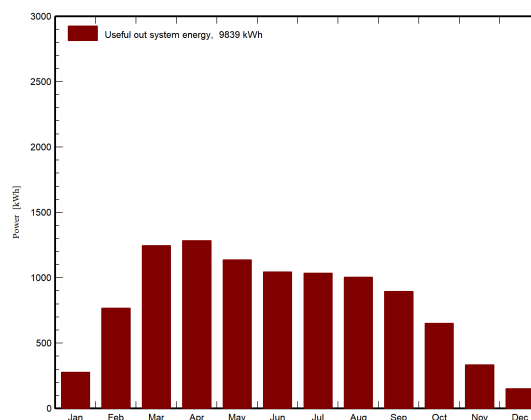
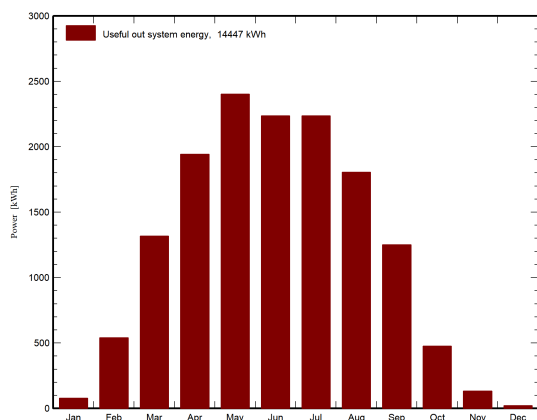
Tabell 9.7 viser oversikt over antall moduler og serier som inngår i de ulike løsningene. Den skiller på løsninger med Maxeon 3 og Series 6, i tillegg til de ulike takarealer og fasadeløsninger. Scenario 3 krever færrest moduler med 405 stykk, mens scenario 4 krever flest med totalt 585 stykk. I tillegg vises det antall moduler for fasader. Disse er på mellom 26 og 66 moduler. Sørfasaden har omtrent dobbelt så mye tilgjengelig areal som øst fasaden, som forklarer hvorfor det også er omtrent dobbelt antall moduler. Det er viktig å påpeke at fasadeløsninger inngår i scenario 2, 3 og 4. Scenario 1 er uten solceller på fasaden. Antall solceller på fasaden er kun vist representativt for å gi et innblikk i hvor mange solcellepaneler et fasadeanlegg ville bestått av for seg selv, ellers er de allerede implementert i det totale anlegget i scenarioene 2-4.

Tabell 9.7: Oversikt over antall moduler og serier i de ulike løsningene

	Antall moduler i serie	Antall strenger	Totalt antall moduler
Maxeon 3			
Tak - Scenario 1	9	54	486
Tak - Scenario 3	9	45	405
Tak - Scenario 4	9	65	585
Fasade øst	11	3	33
Fasade sør	11	6	66
Series 6			
Tak - Scenario 2	2	210	420
Fasade øst	2	13	26
Fasade sør	2	27	54

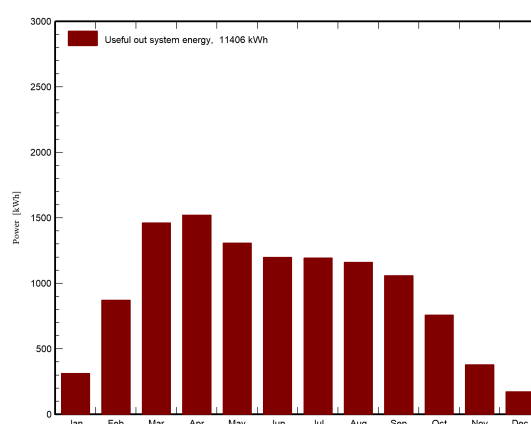
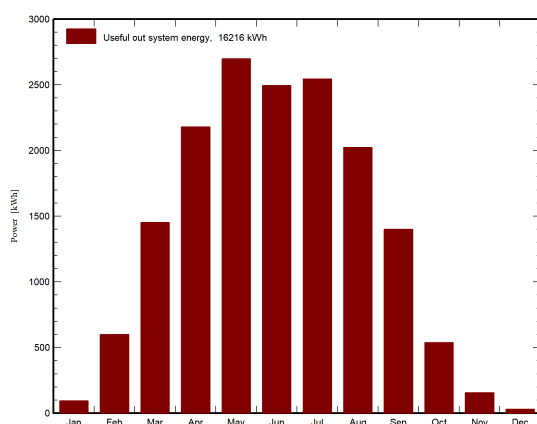
9.1.4 Fasade

Figur 9.2 viser oversikt over resultater fra produksjonen fra både sør og øst fasade. Figurene 9.2a og 9.2b viser produksjonen fra henholdsvis sør og øst fasade ved bruk av panelene fra Series 6. Figurene 9.2c og 9.2d viser produksjonen fra henholdsvis sør og øst fasade ved bruk av panelene fra Maxeon 3. Produksjonen fra sørfasaden har hovedsakelig sine toppe i sommerhalvåret, mens østfasaden produserer mer jevnt utover hele året med størst produksjon rundt mars-april. Totale resultater fra fasadene viser at Maxeon 3 produserer mellom 11-14 % mer enn Series 6.



(a) Årsproduksjon fra sørfasaden med moduler fra Series 6

(b) Årsproduksjon fra østfasaden med moduler fra Series 6



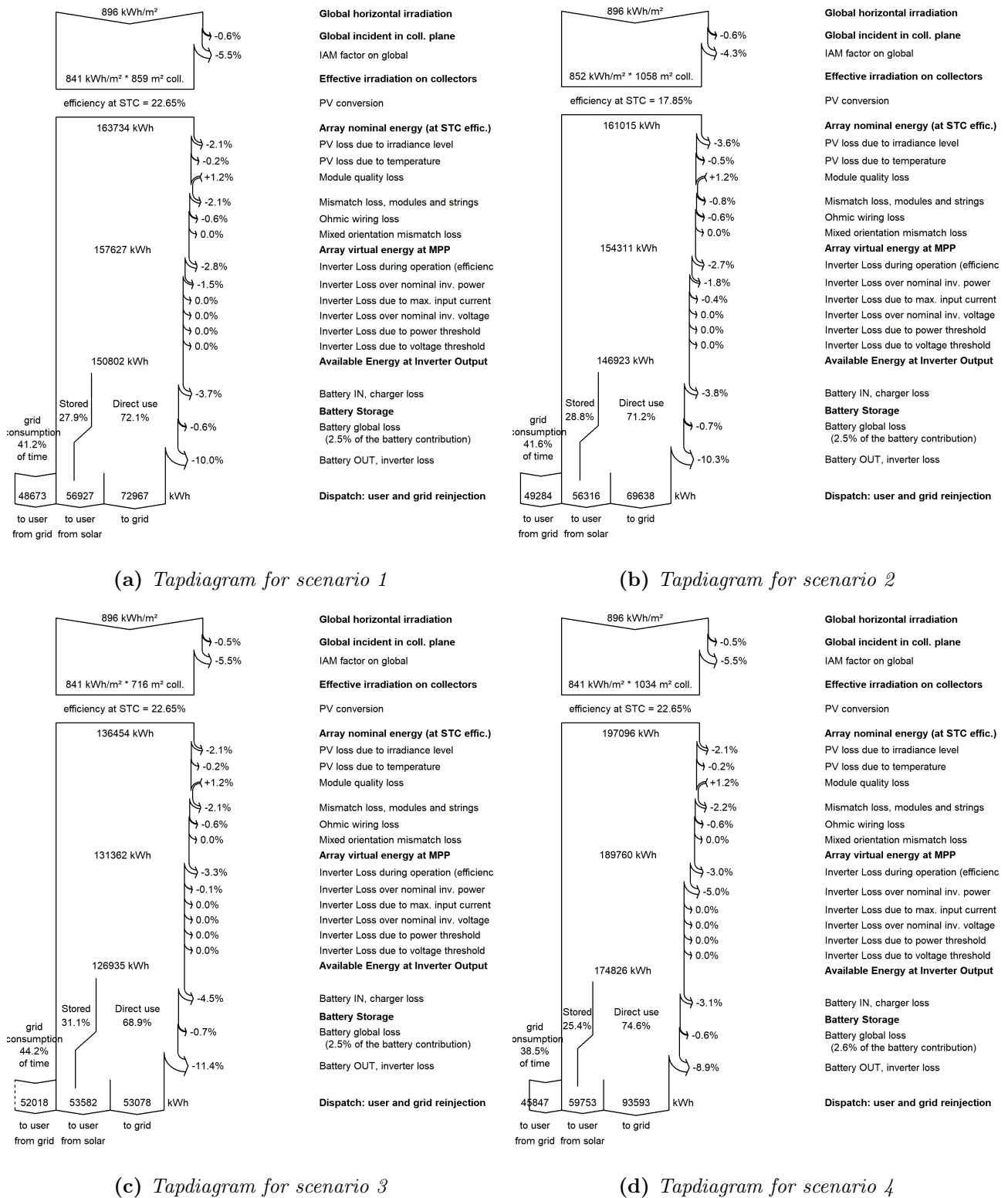
(c) Årsproduksjon fra sørfasaden med moduler fra Maxeon 3

(d) Denne figuren viser årsproduksjon fra østfasaden med moduler fra Maxeon 3 og er hentet fra PVSyst

Figur 9.2: Figuren viser årsproduksjon fra solceller fra øst og sør fasade fra Series 6 og Maxeon 3 og er hentet fra PVSyst

9.1.5 Tapdiagram

Figur 9.3 viser tapdiagrammet til de ulike scenarioene. Diagrammene viser at jo større produksjon, desto vanskeligere er det å lagre energien i batterier. I figur 9.3c er produksjonen minst og energilagringen i batterier når 31.1 %, mens i figur 9.3d er produksjonen størst og energilagringen utgjør den minste prosentandelen. Virkningsgraden ved STC (Standard Test Conditions) er lik for scenario 1, 3 og 4. For scenario 2 er virkningsgraden nesten 5 % lavere. Figur 9.3d viser at scenario 4 har størst tap, mens i figur 9.3c er det mulig å se at scenario 3 har lavest tap av alle de sammenlignede figurene. Figurene 9.3a og 9.3b, altså scenario 1 og 2 har omtrent like tap.

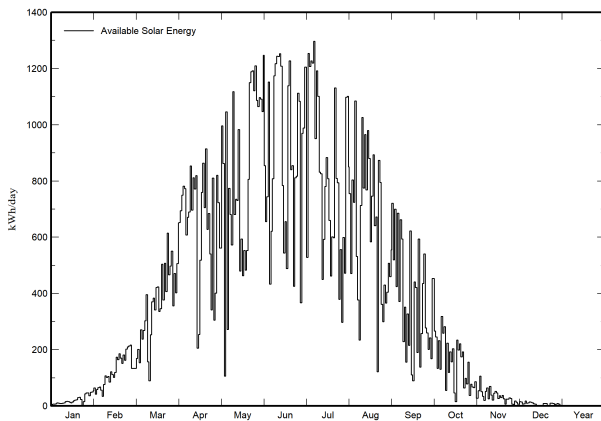


Figur 9.3: Figuren viser tapdiagram for de fire valgte scenariene og er hentet fra PVSyst

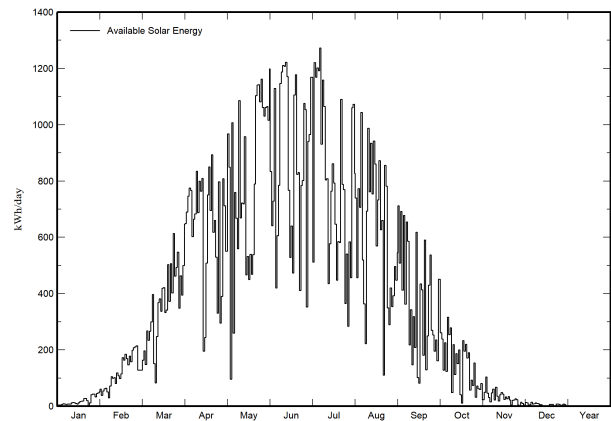
9.1.6 Daglig produksjon gjennom året

Den daglige energiproduksjonen fra solcellene i de fire valgte scenariene er vist i figur 9.4. Dette er den produserte energien fra solcellene før tap. Variasjonen i daglig produsert energi er relativ lik for

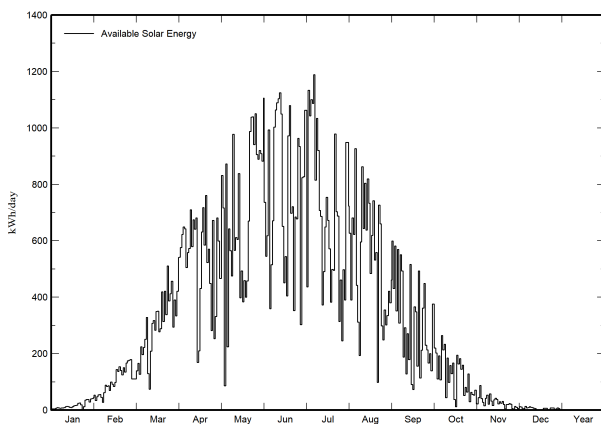
scenario 1 vist i figur 9.4a og scenario 2 vist i figur 9.4b. Scenarioet med høyest daglig produksjon er scenario 4 vist i figur 9.4d og scenarioet med lavest daglig produksjon er scenario 3 som er vist i figur 9.4c.



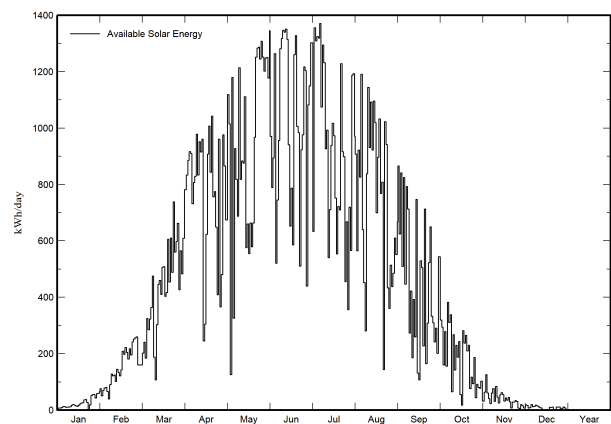
(a) Daglig produksjon gjennom året for scenario 1



(b) Daglig produksjon gjennom året for scenario 2



(c) Daglig produksjon gjennom året for scenario 3

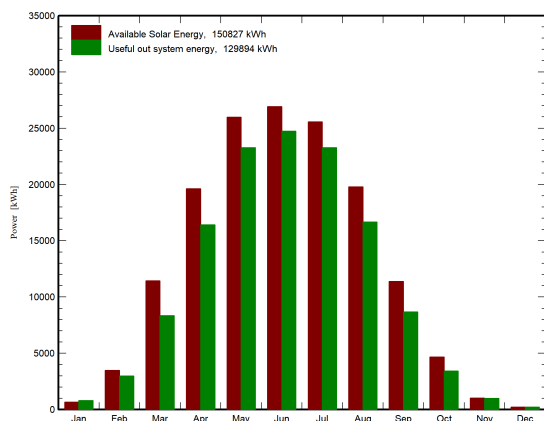


(d) Daglig produksjon gjennom året for scenario 4

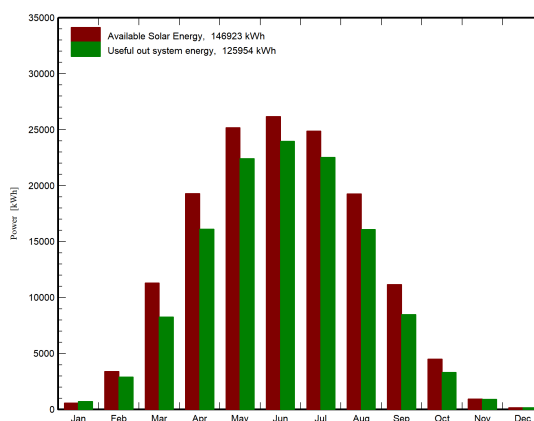
Figur 9.4: Figuren viser den daglige produserte energien fra solcellene gjennom året for de fire valgte scenariene og er hentet fra PVSyst

9.1.7 Tilgjengelig energi

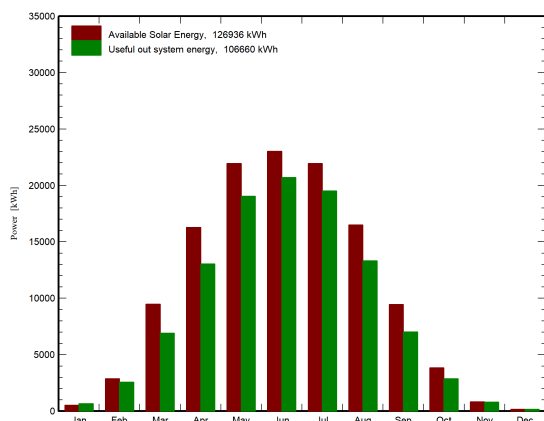
I figur 9.5 under vises det hvor stor del av den produserte energien fra solcellene som kan brukes til å dekke skolens energibehov eller selges til nettet. Dette er beregnet i PVSyst. Resten av energien går ut i tap, som vist i figur 9.3. Utifra figurene vises det at tapet er relativt likt for de forskjellige scenariene og dermed at scenario 4 vist i 9.5d som har høyest produksjon fra solcellene også har størst mengde brukbar energi. Scenario 3 vist i figur 9.5c har både lavest produksjon fra solcellene og den minste mengden brukbar energi. For scenario 1 og 2 vist i figurene 9.5a og 9.5b er det relativt likt.



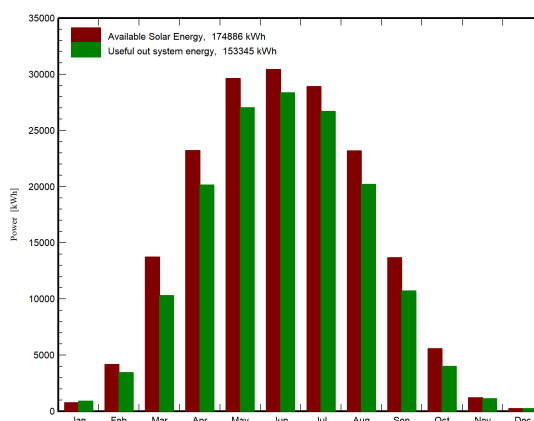
(a) Tilgjengelig energi for scenario 1



(b) Tilgjengelig energi for scenario 2



(c) Tilgjengelig energi for scenario 3

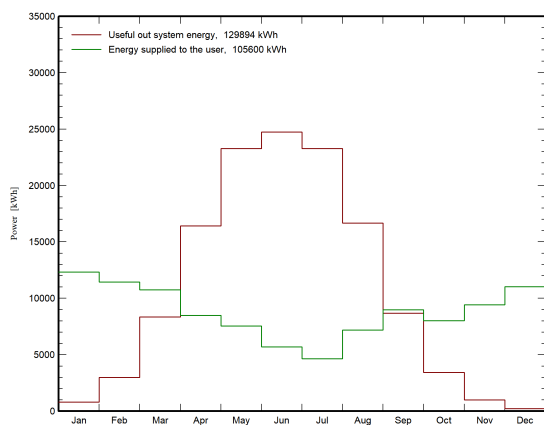


(d) Tilgjengelig energi for scenario 4

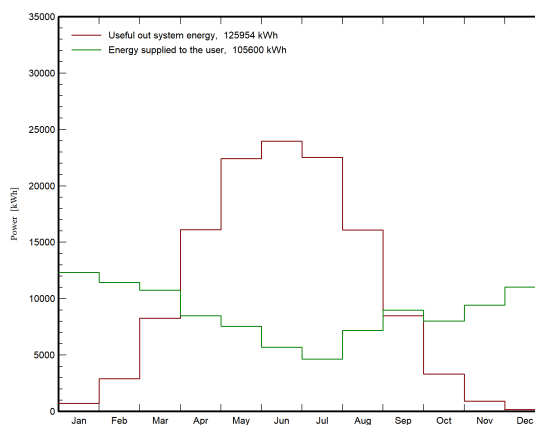
Figur 9.5: Figuren viser den produserte solcelleenergien sammenlignet med den brukbare solcelleenergien for de fire valgte scenariene og er hentet fra PVSyst

9.1.8 Energiforbruk vs energiproduksjon

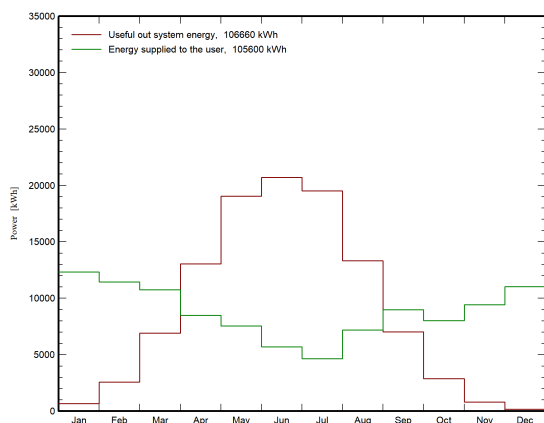
I figur 9.6 under er det vist beregninger fra PVSyst av produsert strøm fra solcellene gjennom året satt opp mot energibehøvet for strøm til Trondheim Katedralskole. Dette er gjort for de fire valgte scenarioene. Den oppgitte produksjonen fra solcellene er etter at tap er trukket fra, som vist over i figur 9.5. Energiforbruket til Trondheim Katedralskole er beregnede verdier og er konstant for alle scenarioene. Utifra figuren kommer det frem at scenario 4 vist i figur 9.6d har mindre underskuddsproduksjon i vintermånedene og større overskuddsproduksjon i sommermånedene enn de tre andre scenarioene. Scenario 3 vist i figur 9.6c har derimot den største underskuddsproduksjon i vintermånedene og den minste overskuddsproduksjon i sommermånedene. For scenario 1 og 2, som er vist i figur 9.6a og 9.6b, er det relativt likt. Alle fire scenarioer har overskuddsproduksjon fra april til august, men Scenario 4 har også overskuddsproduksjon i september.



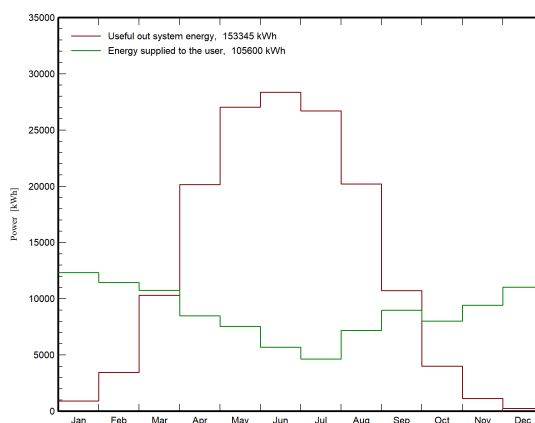
(a) Energiforbruk vs energiproduksjon for scenario 1



(b) Energiforbruk vs energiproduksjon for scenario 2



(c) Energiforbruk vs energiproduksjon for scenario 3



(d) Energiforbruk vs energiproduksjon for scenario 4

Figur 9.6: Figuren viser energiproduksjonen fra solceller for de fire valgte scenariene sammenlignet med energibehovet og er hentet fra PVSyst

9.2 Miljø

Tabell 9.8 viser utslipp i form av $kg CO_2 eq/år$ fra hvert system. Her brukes varmepumpen fra Neotemp med SCOP på 5 og utslippet kommer av elektrisiteten som blir brukt av varmepumpen. Denne tabellen fokuserer bare på utslipp fra drift og ikke utslipp fra produksjon. Elektrisiteten skal gjerne bli dekket av solceller som vil senke utslippene i drift ettersom at solceller har ingen eller lite utslipp i denne fasen. Dersom all elektrisitet, også elektrisiteten som brukes av varmepumpe, blir dekket av solceller ville utslippet bare kommet fra fjernvarme og utslippet ville dermed blitt senket med $770.7 CO_2 eq kg/år$.

Tabell 9.8: Levert energi av hvert system [23]

System	Levert energi [kWh/år]	$CO_2 eq kg/kWh$	Utslipp [$CO_2 eq kg/år$]
Varmepumpe	15124	0.0022	33.3
Fjernvarme	18690	0.0463	865.3
Elektrisitet	67028	0.011	737.4
Totalt	104211		1636

Tabell 9.9 viser utslipp for de forskjellige scenarioene. Tabellen viser utslipp for hele levetiden til

solcellene. For Series 6 ble dette beregnet med $0.278 \text{ CO}_2 \text{ eq kg/Wp}$ multiplisert med den nominelle effekten for solcelleanlegget, mens Maxeon 3 brukte $0.220 \text{ CO}_2 \text{ eq kg/Wp}$ multiplisert nominell effekt. Etersom at Series 6 og Maxeon 3 har ulik levetid ble utslippet deretter delt på levetiden. Dette viser ikke utslipp i driftsfasen men er kun brukt for å kunne sammenligne solcelleanleggene. Her vises det at scenario 3 har aller minst utslipp. Disse tallene ser høye ut sammenlignet med tabell 9.8. Disse kan likevel ikke sammenlignes ettersom at den ene tabellen fokuserer på driftsfasen til energisystemet til Trondheim Katedralskole mens den andre tabellen fokuserer på produksjonen av solceller. Solcelleanleggene har også ulik produksjon og derfor ble det også delt på årsproduksjonen for å sammenligne dem. Slik som i beregninger med solceller i kapittel 8, er utslipp per scenario nokså like. Resultatet er høyere her enn i kapittel 8 ettersom at det også er tatt hensyn til batterier og tap i systemet.

Tabell 9.9: *Utslipp fra solceller i de ulike scenarioene*

Scenario	1	2	3	4
Levetid [år]	25	30	25	25
Utslipp [kg eq CO_2]	42680	52542	35640	51480
Utslipp/år [kg eq CO_2 /år]	1707.2	1751.4	1425.6	2059.2
Utslipp/kWh [g eq CO_2 /kWh]	13.14	13.91	13.37	13.43

9.3 Elektrisk energilagring

Det har blitt presentert tre ulike forslag til elektrisk energilagring i forskningsdelen av denne rapporten. En enkel oppsummering av resultater fra de ulike batteriteknologiene og leverandørene er mulig å se i figur 9.10. Tabellen viser hvilken batteriteknologi som best oppfyller følgende parametre: leverandørsikkerhet, sikkerhetsaspekt, batteriytelse, størrelse og miljøaspekt, utifra prosjektets forutsetninger.

Tabell 9.10: *Resultater fra batteridelen som viser hvilken batteriteknologi som best oppfyller de forskjellige parametre.*

	Nye LiB	Gjenbrukte LiB	Flytbatterier
Leverandørsikkerhet	X	X	
Sikkerhetsaspekt			X
Batteriytelse	X		
Størrelse	X	X	
Miljøaspekt		X	X

Både nye og gjenbrukte litiumionebatterier er godt etablert på det norske markedet og på verdensbasis, mens flytbatterier er ganske nye på markedet og per nå finnes det kun én leverandør av vanadiumbaserte flytbatterier i Norge. Av den grunn er det litiumbatterier som har størst leverandørsikkerhet. Når det gjelder sikkerhetsaspektet er det omtrent samme utfordringer med både nye og gjenbrukte batterier. Grunnet branner som er vanskelig eller umulig å slukke og fare for eksplosjon er ikke LiB det tryggeste valget. I tillegg er det en fare ved LiB knyttet til lekkasje av farlige gasser. For flytbatterier er det hovedsakelig fare knyttet til lekkasje av elektrolytten som er giftig og ikke bør havne i avløpet, men ellers anses disse som en av de tryggeste teknologiene.

Under batteriytelsesdelen ser en hovedsakelig på energitetthet og levetid. Nye litiumionebatterier har en meget god energitetthet. Gjenbrukte LiB har omtrent halvparten av energitettheten til de nye batteriene. Det er likevel flytbatterier som kommer verst ut her med batterienergitetthet på omtrent

5-6 % av nye LiB og dermed også 10-12 % av energitettheten til gjenbrukte litiumionebatterier. Levetiden til nye litiumbatterier er noe lenger enn for gjenbrukte batterier, men dersom man ser på "first life" til gjenbrukte batterier i kombinasjon med "second life" så er heller de som har best resultat, altså lengst levetid. Likevel har ikke brukte LiB vært på markedet lenge nok til å vise at den beregnede levetiden faktisk vil stemme. Det er flytbatterier som anses som teknologien med lengst levetid blant disse tre alternativene, spesielt dersom en velger å gjenbruke elektrolytten. Det er likevel ikke bekreftet om denne levetiden faktisk er realistisk, da de er meget nye på markedet. Det hele viser at det er nye LiB som vil levere batterier med den beste ytelsen.

Størrelsesmessig opptar både nye og gjenbrukte litiumbatterier minst plass. Grunnet lavere energitetthet opptar vanligvis gjenbrukte LiB mer plass enn nye, men ettersom Evyons batterier ikke har vært i bruk før, er størrelsen deres noe mindre. Flytbatterier opptar omtrent 7 ganger så mye plass som nye LiB og omtrent 11 ganger så mye plass som gjenbruke LiB. Arealmessig er de ikke godt egnet til det valgte batterirommet. Høydemessig er det ingen av alternativene som egner seg til det laveste punktet i batterirommet. LiB, både brukte og nye, kan plasseres ved det punktet med høyest tak da de opptar lite areal. Dette kan ikke gjøres med flytbatterier da de opptar nesten hele batteriromarealet. Av den grunn er det nettopp litiumionebatterier som gjør det best på størrelsesaspektet.

Fra miljøperspektivet kommer nye LiB verst ut, da det er mye utslipp knyttet til produksjonen og resirkulering av denne type batterier har ikke kommet langt. Gjenbrukte litiumbatterier gjør det mye bedre ettersom produksjonsutslippene ikke inngår i deres livsløpsfase. I tillegg blir det totale livsløpet forlenget i forhold til nye litiumbatterier. Flytbatterier har omtrent like høye produksjonsutslipp som nye LiB. De gjør det likevel bedre på resten av livsløpsstadiet, i tillegg til å ha lenger levetid og mulighet for å ta i bruk gjenbrukt elektrolytt. Av den grunn er det brukte LiB og flytbatterier som gir de beste miljøresultatene.

Ettersom dette prosjektet har fokus på å oppnå krav om nullutslippsbygg i løpet av driftsfasen, er det veldig viktig å tenke på miljøaspektet ved valg av de ulike teknologiene. Det er sikker levering knyttet til både nye og brukte LiB. I tillegg opptar de omtrent like mye plass. Det som skiller nye og gjenbrukte litiumbatterier er batteriytelsen og miljøaspektet. Nye LiB har høyere energitetthet enn gjenbrukte, mens gjenbrukte LiB har mye lavere klimafotavtrykk enn nye. Grunnet fokus på miljø i denne oppgaven anses det derfor som hensiktsmessig å bruke et alternativ som gir gode miljøresultater.

10 Diskusjon

Denne delen av rapporten tar utgangspunkt i drøfting av forskning gjennomført i tilknytting til Trondheim Katedralskole. Ikke minst skal det diskuteres resultater og eventuelle usikkerhetsmomenter. Dette kapitlet skal legge et grunnlag for konklusjonen av oppgaven.

For å oppnå krav om nullutslippsbygg ved driftsfasen trenges det en fornybar energiproduksjon på 105600 kWh /år. I forskningsdelen er det laget 16 ulike scenarioer med solceller fra Series 6 og Maxeon 3. De tar utgangspunkt i ulike areal og anlegg med og uten batterier, i tillegg til at noen av scenarioene har med fasadeløsninger. Det er også valgt å følge kravspesifikasjoner fra RIE som tilsier at det skal brukes samme fabrikat og modell på alle solceller. Alle scenarioer oppfyller disse kravene. Ut ifra disse er det 4 scenarioer som i tillegg oppfyller krav om ZEB-O og prosjektspesifikke miljøoppfølgingskrav. Det er dermed blitt valgt å gå videre med disse.

10.1 Scenarioene

Scenario 1 baserer seg på Maxeon 3 solceller med 1 m avstand fra takkanten, og er den eneste løsningen uten solceller på fasaden. Denne løsningen er å foretrekke dersom en har fokus på det historiske inntrykket til bygget, og arkitektens visjon. Dette scenarioet produserer 129894 kWh /år, som er godt over ZEB-O krav. Dette gir et potensial til videreutvikling mot høyere ZEB-nivåer. Det er også den løsningen som gir minst utslipp per kWh produsert energi sett utifra hele livsløpszyklusen. En ulempe med scenario 1 er at 1 m avstand fra takkanten krever sikringer, noe som øker installasjonskostander.

Scenario 2 er det eneste scenarioet som bruker solcellemodulene fra Series 6. Denne løsningen er prosjektert med 1 m avstand fra takkanten og med solcelleløsninger på fasaden. På grunn av fasadeløsningen kan det historiske inntrykket til bygget bli svekket. En kan velge å anvende enten BAPV eller BIPV. Det er likevel mer hensiktsmessig å bruke BIPV på et nybygg grunnet besparelse i materialbruken og dermed også det totale utslippet. Dette vil ikke nødvendigvis være tilfellet ved en renovasjon. Series 6 er et tyntfilmpanel, noe som gjør at det har et renere uttrykk enn Maxeon 3. Siden panelene har en ensartet farge kan de gi et bedre estetisk inntrykk enn en monokrystallinsk solcelle som Maxeon 3. Scenario 2 har nokså lik produksjon som scenario 1. Likevel har Series 6 større utslipp per kWh enn det Maxeon 3 har. Dette er dermed scenarioet med aller mest utslipp. Series 6 er også den modulen som har lavest virkningsgrad og hvert enkelt panel produserer dermed mindre energi enn Maxeon 3.

Scenario 3 bruker Maxeon 3 solceller og er det eneste scenarioet som har 3 m avstand fra takkant. Ved denne avstanden er det ikke behov for sikringer. Det er også solceller på fasaden som kan svekke det historiske inntrykket. Produksjonen fra disse solcellene er 106660 kWh /år, noe som når ZEB-O kravet med små marginer. Dette gir mindre overflødig produksjon på sommerhalvåret da skolen ikke er i bruk og mens det er mest utfordringer med energilagring. Dette scenarioet har høyest andel energilagring og minst tap av alle scenarioene og egnes dermed best med batterier. Denne løsningen krever også færrest moduler og vil derfor gi minst utslipp sammenlignet med de andre scenarioene.

Scenario 4 består av Maxeon 3 solceller med 1 m avstand fra takkant og solceller på fasade. Dette er det scenarioet med flest moduler og høyest produksjon på 153345 kWh /år. Dette scenarioet overstiger ZEB-O kravet med 45 % og er det scenarioet med høyest potensial til å oppnå høyere ZEB-nivå, altså ZEB-OM. Etersom at det ikke er målet med prosjektet er ikke dette av stor betydningen for oppgaven. Nybyggene har ikke behov for så mye energi og derfor vil mye av produksjonen gå til strømmettet. Dette er ikke optimalt grunnet dagens plusskundeordning. Ved så høy produksjon er det vanskeligere å lagre energien i batterier og scenario 4 er dermed løsningen med lavest energilagring.

10.2 Usikkerheter i prosjektet

Beregningene i prosjektet ble gjort i programmet PVSyst. Det er en usikkerhet knyttet til resultatene i programmet, som er grunnet antagelser som er gjort underveis i prosjektet. Resultatene fra tak og fasade kan avvike fra virkelig produksjon ettersom at det ikke var mulig å legge disse sammen i programmet. I PVSyst ble den nominelle effekten lagt sammen og systemet ble simulert som om det bare var på taket. Når en ser på årsproduksjonen til scenarioene kan vinterproduksjonen dermed avvike ettersom at produksjonen fra østfasaden er mer jevnt fordelt utover året. Det kan også være avvik knyttet til sammenkobling med batterier og invertere ettersom at ulike flater kan kreve hver sin inverter.

Når det kommer til batterier i PVSyst var det kun mulig å velge mellom litiumionebatterier og blybatterier. Derfor ble samme batteriet valgt for alle scenarioer for å ha god nok sammenligningsgrunnlag. For å oppnå tilstrekkelig energilagingsandel er det regnet med lav C-verdi. Dette vil ikke nødvendigvis være tilfellet i virkeligheten ettersom at man vil ha lenger ladning- og utladningstid for å ikke minske effektiviteten til batteriet. Batteriet som er benyttet i programmet viser ikke hvordan de foreslåtte batteriene fungerer i systemene. Batteriene som anbefales videre fokuserer da hovedsakelig på informasjonen gitt av leverandører og ikke den innhentet fra PVSyst.

10.3 Elektrisk energilagring

I dette prosjektet er det foreslått 3 alternativer for elektrisk energilagring. Disse innebærer nye og gjenbrukte litiumionebatterier og flytbatterier. I forskning- og resultatdelen har batteriene blitt vurdert utifra ulike aspekter som leverandørsikkerhet, batteriytelse og sikkerhet. Dette er likevel ikke de avgjørende faktorene for det endelige valget i dette prosjektet. Hovedfokuset går til miljøaspektet ved bruk av batterier, og ikke minst størrelsen de opptar. Ettersom batterirommet har en satt størrelse, er det avgjørende å finne en batteriløsning som passer i dette rommet.

Høyden på et flytbatterianlegg fra Bryte vil passe best av alle foreslåtte alternativer til rommet på Trondheim Katedralskole. Det kommer likevel tydelig frem at flytbatterier opptar mer areal enn det som er tilgjengelig. Plasseringen av batterirommet er også meget ugunstig ved pumping av elektrolytten inn i batteriene. I tillegg har vanadium flytbatterier bare en leverandør i Norge og de er nye på markedet, både i Norge og på verdensbasis. Dette fører til en usikkerhet rundt verdiene som er oppgitt for batteriet. Videre vil det være den tryggeste batteriløsningen grunnet at det ikke er fare for brann eller eksplosjon. Når det kommer til miljøaspektet er flytbatterier en grei løsning å bruke, dersom elektrolytten gjenbrukes. Grunnet arealutfordringer og plassering av batterirommet er det likevel ikke mulig å bruke disse batteriene i dette prosjektet.

Nye LiB fra Pixii og gjenbrukte LiB fra Evyon har mange like parametere. De har omtrent like resultater knyttet til leverandørsikkerhet, størrelse og sikkerhetsaspektet i batterirommet. De er ikke det tryggeste alternativet grunnet fare for brann og eksplosjon. Likevel egner de seg best til batterirommet på Trondheim Katedralskole grunnet areal. Ettersom begge batteriløsningene opptar lite areal, er de enklere å plassere et gunstig sted i batterirommet. Dette gjør at takhøyden i rommet ikke lenger er en utfordring. Det som skiller disse batteriene fra hverandre er at nye LiB gjør det bedre på batteriytelse, mens gjenbrukte gjør det bedre på miljøaspektet. Den totale analysen viser da at nye og brukte litiumionebatterier gir de beste resultatene.

10.4 Energilagingsstrategier og energiutveksling

Det er ulike strategier for gunstig energilagring. Om sommeren vil det som regel være en overproduksjon av energi fra solcellene. Da kan det lønne seg å ha batteriet i sommermodus der overproduksjon vil kunne selges til strømmettet. Med dagens plusskundeordning vil det ikke være mulig å selge mer enn 100 kW. Om vinteren vil det være en underskuddsproduksjon og det må kjøpes strøm fra nettet. Da kan det være lurt å ha batteriet i vintermodus hvor batteriet lagrer energi fra nettet om natta når strømmen er billigst og effekttoppene er lavest.

Batterier er mest gunstig for effektutjevning i nettet og har ikke så stor påvirkning på miljøprofilen til bygget. Siden det er tap tilknyttet bruken av batterier blir den brukbare energien fra solceller lavere. Resultatdelen av oppgaven viser at solcelleanleggene uten batterier har større produksjon av brukbar energi. Det er også en del utslipp tilknyttet produksjon av batterier. Siden den norske kraftmiksen hovedsakelig består av fornybar energi vil det være like gunstig utifra miljøaspektet å hente energi fra strømmettet som fra batterier. Det vil dermed ikke være nødvendig med batterier for å nå ZEB-O krav, men batterier kan være lurt å ha med for å utjevne effekttopper på strømmettet.

Når det kommer til energiutveksling mellom nye og gamle bygg har det vært utfordringer knyttet til strømmett og deling av energi. Det er allerede en nettstasjon ved de gamle byggene. Det skal komme en til nettstasjon for at hele systemet skal kunne tåle lasten fra egen fornybare energiproduksjon. Det har ikke blitt oppgitt antall strømmålere men ettersom at det er to nettstasjoner må det være minst to strømmålere. Dersom den nye nettstasjonen blir tilknyttet nye og gamle bygg, kan byggene med solceller dele energi med byggene uten solceller. Dersom den nye nettstasjonen kobles uavhengig av den gamle, må solcelleanlegget være koblet til begge nettstasjoner for å kunne dele strøm på tvers av bygg.

11 Konklusjon

Hovedmålet med denne oppgaven er å utforske alternativer for solcelleprosjektering i kombinasjon med energilagring på Trondheim Katedralskole med fokus på ZEB-O. For å oppnå disse kravene ble det stilt strenge krav til solcelle- og batterivalg, og miljøet ble satt i fokus. Det er i tillegg tatt hensyn til flere prosjektspesifikke krav som miljøoppfølgingsplan, kravspesifikasjoner og prosjektspesifikk energikonsept gitt av Rambøll.

Ettersom prosjektet har fokus på ZEB-O krav, har gruppen valgt å konkludere med et scenario som best oppfyller disse miljøkravene, nemlig scenario 3. Dette scenarioet har det laveste utslippet i løpet av hele livsløpsfasen, samt lavest overskuddsproduksjon. Det å velge scenario 3 vil da gi den mest optimale produksjonen og vil være det mest miljøvennlige solcelleprosjekteringsalternativet. Dette anlegget vil da bestå av 405 paneler fra Maxeon 3, med 3 m avstand fra takkanten, i tillegg til solceller på fasaden. Det er valgt å ikke se på løsninger med mye overproduksjon ettersom dette fører til utfordringer knyttet til energiutveksling. Denne løsningen er blant løsningene som svekker det historiske inntrykket til bygget. Ettersom det er miljøet som er i fokus, er dette dermed ikke sett på som en avgjørende faktor.

Det er valgt å konkludere med gjenbrukte litiumionebatterier som det beste alternativet for elektrisk energilagring i dette prosjektet. Disse er effektive, i tillegg til å være miljøvennlig, og et anlegg på 3 batteristrenger (132 kWh) fra Evyon vil da være det mest gunstige valget. For å best utnytte denne batteriløsningen vil det lønne seg å ha batteriet i sommer- og vintermodus. Nye litiumionebatterier har en høyere ytelse, men gjenbrukte er det mest miljøvennlige alternativet. Siden ZEB-O krav er fokuset i dette prosjektet, er løsningen valgt på grunnlag av miljø. Når det gjelder energiutvekslingen mellom byggene er dette mulig å gjennomføre på to forskjellige måter, slik det ble forklart i diskusjonen, se kapittel 10. Det er ikke en av alternativene som er bedre enn den andre, og det endelige valget kan tas av nettselskapet.

Etter undersøkelser vil gruppen påstå at batterier ikke er et nødvendig tiltak for å oppnå ZEB-O, ettersom de selv ikke produserer energi, men heller fører til tap i den totale produksjonen. De vil likevel være nyttig for effektutjevning og eventuell lagring av energi ved høy produksjon og lite forbruk. Av den grunn vil gruppen foreslå å revurdere den prosjektspesifikke miljøoppfølgingsplanen med tanke på kravet om elektrisk energilagring. Det kan være nyttig å endre andelen av minimumskravet for elektrisk energilagring. Dette ble likevel ikke regnet på og kan dermed være interessant å undersøke senere. Resultatene i kapittel 9 viser at det kan lønne seg å kun bruke energien direkte fra solcelleanlegget og strømmettet ved behov, i tillegg til å selge overskuddselektrisiteten, istedenfor å bruke batterier. I videre arbeid er det dermed viktig å vurdere om en vil satse på høyest mulig produksjon eller optimalisering av strømmettet ved effektoppkutting.

Referanser

- [1] Coromatic AS. «NORBAT ENKELTCELLER». no. I: (2023). URL: https://coromatic.no/76786_wp-uploads/2017/03/Batteriguident-2017-1.pdf (sjekket 04.10.2023).
- [2] Bjørn Pedersen. *diffusjon*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/diffusjon> (sjekket 13.05.2023).
- [3] NVE - Reguleringsmyndighetene for energi - RME. *Batterier i distribusjonsnettet*. Tekn. rapp. 2020. URL: <https://publikasjoner.nve.no/diverse/2020/batterier.i.distribusjonsnettet.pdf> (sjekket 2020).
- [4] R S Muller, T I Kamins og M Chan. *Device Electronics for Integrated Circuits*. 3. utg. Hoboken, New Jersey, U.S: John Wiley & Sons, 2002.
- [5] Knut Hofstad. *fotovoltaisk effekt*. no. Jan. 2023. URL: https://snl.no/fotovoltaisk_effekt (sjekket 13.05.2023).
- [6] Enova. *Samspill for grønn områdeutvikling*. no. URL: <https://www.enova.no/bedrift/bygg-og-eiendom/tema/samspill-for-gronn-omradeutvikling/> (sjekket 13.05.2023).
- [7] SINOVOLTAICS. *Solar Hybrid System: comparison with grid-tied and standalone systems*. en. URL: <https://sinovoltaics.com/learning-center/consumers/solar-hybrid-system-vs-grid-tied-vs-standalone-choose/> (sjekket 10.04.2023).
- [8] Bjørn Pedersen. *krystallstruktur*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/krystallstruktur> (sjekket 13.05.2023).
- [9] Jakob Sandstad og Øyvind Grøn. *vekselstrøm*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/vekselstr%C3%B8m> (sjekket 13.05.2023).
- [10] Nora Holst Haaland. *Hvilke typer solcelle-teknologier passer for meg?* nb. URL: <https://blogg.fusen.no/alle/ulike-typer-solcelleteknologi> (sjekket 10.04.2023).
- [11] Gaute Stokkan. *doping – teknikk*. no. Jan. 2023. URL: https://snl.no/doping_-_teknikk (sjekket 13.05.2023).
- [12] Bjørn Pedersen. *oktettregelen*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/oktettregelen> (sjekket 12.04.2023).
- [13] Energy Information Administration - EIA. *Utility-scale batteries and pumped storage return about 80% of the electricity they store*. en. URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46756> (sjekket 19.04.2023).
- [14] Heidi Rapp Nilsen. *sirkulær økonomi*. no. Feb. 2023. URL: https://snl.no/sirkul%C3%A6r_%C3%B8konomi (sjekket 13.05.2023).
- [15] BioLogic. *What are SOC and SOH of a battery, how to measure them?* en-US. URL: <https://www.biologic.net/topics/battery-states-state-of-charge-soc-state-of-health-soh/> (sjekket 19.04.2023).
- [16] Tone Tønjum. *substrat*. no. Jan. 2023. URL: <https://sml.snl.no/substrat> (sjekket 13.05.2023).
- [17] Carina Nilstun. *synergi*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/synergi> (sjekket 13.05.2023).
- [18] Birgit Risholt Seniorforsker. *Er litiumbatterier brannfarlige?* no. Jun. 2021. URL: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/er-litiumbatterier-brannfarlige/> (sjekket 11.04.2023).
- [19] Marte Orderud Skare. *tynnfilm*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/tynnfilm> (sjekket 13.05.2023).
- [20] Trøndelag fylkeskommune. *HANDLINGSPLAN FOR KLIMAOMSTILLING 2021-2023*. Tekn. rapp. 2020. URL: <https://www.trondelagfylke.no/contentassets/4ac3e1bb2dc94358b0c28b83b205770f/handlingsplan-for-klimaomstilling-2021-2023.pdf> (sjekket 03.02.2023).

-
- [21] Keilman Thomas. Forskningsrådet. *Bygger bedre kunnskap for en mer bærekraftig byggebransje*. no. 2021. URL: <https://www.forskningsradet.no/sok-om-finansiering/hvem-kan-soke-om-finansiering/naringsliv/prosjekter-naringslivet/bygger-bedre-kunnskap-for-en-mer-barekraftig-byggebransje/> (sjekket 03.02.2023).
- [22] Trøndelag fylkeskommune. *Prosjektspesifikk miljøoppfølgingsplan*. no. Trøndelag fylkeskommune, 2022.
- [23] L C Felius. *Trondheim Katedralskole Energikonsept*. no. Rambøll Norge AS, Kobbegate 2, 7042 Trondheim, Norway, 2023.
- [24] Suresh B. Sadineni, Srikanth Madala og Robert F. Boehm. «Passive building energy savings: A review of building envelope components». en. I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.8 (okt. 2011), s. 3617–3631. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.014. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111002504> (sjekket 25.04.2023).
- [25] V Novakovic mfl. *ENØK i bygninger - Effektiv energibruk*. 3. utg. Postboks 6860 St.Olav Plass 0130 Oslo: Gyldendal Norsk Forlag AS, 2007.
- [26] Jan Vincent Thue. *U-verdi*. no. Jul. 2019. URL: <https://snl.no/U-verdi> (sjekket 25.04.2023).
- [27] Associate Prof. Mohamed Hamdy. *Lecture 2 - Part 1 - notes - TEP 4235 Heat Transfer, R-value, U-values 2022*. en. Sep. 2022.
- [28] Associate Prof. Mohamed Hamdy. *Lecture 2 - Part 2 - notes - TEP 4235 U-value calculation, reality, and Building regulations 2022*. en. Sep. 2022.
- [29] Lamb Jacob J Pollet Bruno G. *Energy-Smart Buildings. Design, construction and monitoring of buildings for improved energy efficiency*. 1. utg. Temple Circus, Temple Way, Bristol, BS1 6HG, UK: IOP Publishing, 2020.
- [30] A Gustavsen og J V Thue og P B og A Dalehaug og T Aurlien og S Srynning og S Uvsløkk. *Kuldebroer – Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*. no. 2008.
- [31] Direktoratet for byggkvalitet. *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. no. 2017. URL: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17> (sjekket 17.02.2023).
- [32] § 14-2. *Krav til energieffektivitet*. no. URL: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-2> (sjekket 04.04.2023).
- [33] Per Rygh. *passivhus*. no. Mai 2021. URL: <http://snl.no/passivhus> (sjekket 24.02.2023).
- [34] Sintef. *473.015 Dokumentasjon av passivhus og lavenergibygninger i henhold til NS 3700 og NS 3701 - Byggforskerien*. URL: https://www.byggforsk.no/dokument/4109/dokumentasjon_av_passivhus_og_lavenergibygninger_i_henhold_til_ns_3700_og_ns_3701 (sjekket 24.02.2023).
- [35] Marit Sæter. *Norsk standard er trukket tilbake, men vises fortsatt til i byggteknisk forskrift*. Sep. 2021. URL: <https://www.tu.no/artikler/ns-3031-beregning-av-bygningers-energiytelse-er-trukket-tilbake-men-vises-fortsatt-til-i-byggteknisk-forskrift/513576> (sjekket 24.02.2023).
- [36] Passive House Inst. *Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard*. Tekn. rapp. 2016. URL: https://passipedia.org/_media/picopen/9f_160815_phi_building_criteria_en.pdf (sjekket 24.02.2023).
- [37] Standard Norge. *Kriterier for passivhus og lavenergibygninger. Yrkesbygninger. NS3701:2012*. nn-NO. Opphavsrett er oppgitt i vedlegg I 1.sep. 2012. 2012. URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=587802> (sjekket 28.03.2023).
- [38] Grønn Byggallianse. «Tekniske og økonomiske perspektiver fra utbyggers ståsted». no. I: (2013). URL: <https://byggalliansen.no/wp-content/uploads/2018/11/Nullutslippsbygg-Veiledning.pdf> (sjekket 28.03.2023).
- [39] The Research Centre on Zero Emission Buildings. *Om ZEB Senter*. URL: <http://www.zeb.no/index.php/no/om-zeb/about-the-zeb-centre> (sjekket 28.03.2023).
-

-
- [40] Selamawit Mamo Fufa. Reidun Dahl Schlanbusch. Kari Sørnes. Marianne Rose Inman. Inger Andresen. *A Norwegian ZEB Definition Guideline*. en. SINTEF Academic Press, 2016. ISBN: 978-82-536-1513-4. URL: https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2401097/ZEB_pr_report_no29.pdf?sequence=3&isAllowed=y (sjekket 28.03.2023).
- [41] EUROPEAN COMMISSION. *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives*. en. 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662> (sjekket 24.02.2023).
- [42] Ingvild Ulrikke Jakobsen, Steffen Kallbekken og Bård Lahn. *Parisavtalen*. no. Jan. 2023. URL: <https://snl.no/Parisavtalen> (sjekket 27.03.2023).
- [43] Ellen Jenny Ravndal og Jo Halvard Halleraker. *FNs bærekraftsmål*. no. Jan. 2023. URL: https://snl.no/FNs_b%C3%A6rekraftsm%C3%A5l (sjekket 25.04.2023).
- [44] Directorate-General for Energy (European Commission). *Clean energy for all Europeans*. eng. LU: Publications Office of the European Union, 2019. ISBN: 978-92-79-99835-5. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/9937> (sjekket 27.03.2023).
- [45] International Energy Agency. *Buildings – Analysis*. en-GB. URL: <https://www.iea.org/reports/buildings> (sjekket 27.03.2023).
- [46] European Council. *Fit for 55*. en. Mar. 2023. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (sjekket 27.03.2023).
- [47] Olje- og energidepartementet. *Forslag til revidert bygningsenergidirektiv*. no. EOSnotat. Publisher: regjeringen.no. Des. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2022/des/forslag-til-revidert-bygningsenergidirektiv/id2959442/> (sjekket 27.03.2023).
- [48] Karoline Røvik Zeiner og Bjarki Reyf. *Her er EU-kravene eiendomsbransjen må ruste seg for*. nb-no. Section: juss. Mar. 2023. URL: <https://www.estatenyheter.no/her-er-eu-kravene-eiendomsbransjen-ma-ruste-seg-for/369662> (sjekket 25.04.2023).
- [49] Buildings Performance Institute Europe. *97% of buildings in the EU need to be upgraded. BPIE - Buildings Performance Institute Europe*. en-US. URL: <https://www.bpie.eu/publication/97-of-buildings-in-the-eu-need-to-be-upgraded/> (sjekket 25.04.2023).
- [50] Harald Jarning og Taran Thune. *norsk utdanningshistorie*. no. Feb. 2023. URL: <https://snl.no/norsk-utdanningshistorie> (sjekket 12.04.2023).
- [51] Trondheim Katedralskole. *Skolens historie*. nb-NO. URL: <https://web.trondelagfylke.no/trondheim-katedralskole/om-skolen/skolens-historie/> (sjekket 03.02.2023).
- [52] Trondheim Kommune. *PLANBESKRIVELSE*. Tekn. rapp. 2021. URL: https://www.trondheim.kommune.no/globalassets/10-bilder-og-filer/10-byutvikling/byplankontoret/1b_off-ettersyn/2021/gnrbnr-40086-m.fl.-trondheim-katedralskole-detaljregulering-r20200030/1.-planbeskrivelse.pdf (sjekket 03.02.2023).
- [53] M S Nilsen. *Trondheim Katedralskole Bygningsfysisk Konsept*. no. Rambøll Norge AS, Kobbegate 2, 7042 Trondheim, Norway, 2022.
- [54] Olje- og energidepartementet. *Ny ordning for deling av egenprodusert, fornybar straum*. nn-NO. Pressemelding. Publisher: regjeringen.no. Feb. 2023. URL: <https://www.regjeringen.no/nn/aktuelt/ny-ordning-for-deling-av-eigenprodusert-fornybar-straum/id2964122/> (sjekket 27.03.2023).
- [55] Sindre Haarr. *Energiloven må grønnvaskes - Norsk Kommunalteknisk Forening*. no. 2020. URL: <https://www.kommunalteknikk.no/-energiloven-maa-groennvaskes.6279926-40825.html> (sjekket 17.02.2023).
-

-
- [56] Olje-og energidepartementet. *Vil etablere ordning for deling av egenprodusert strøm i borettslag og næringsbygg*. no. Pressemelding. Publisher: regjeringen.no. Jul. 2022. URL: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/vil-etablere-ordning-for-deling-av-egenprodusert-strom-i-borettslag-og-naeringsbygg2/id2922135/> (sjekket 27.03.2023).
- [57] NVE. *Plusskunder - NVE*. no. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/regulering/nettvirksomhet/nettleie/tariffer-for-produksjon/plusskunder/> (sjekket 27.03.2023).
- [58] Statkraft Varme. *Fjernvarmeanlegget i Trondheim — Statkraft Varme*. no. URL: <https://www.statkraftvarme.no/om-statkraftvarme/fjernvarmeanlegg/trondheim/> (sjekket 21.02.2023).
- [59] Håvard Egge. *Byene våre er skjulte kraftverk*. nb-NO. Nov. 2017. URL: <https://geminino.no/2017/11/byene-vare-skjulte-kraftverk/> (sjekket 12.04.2023).
- [60] Sintef. *Utvikling av smarte termiske nett*. no. Jan. 2017. URL: <https://www.sintef.no/prosjekter/2015/utvikling-av-smarte-termiske-nett/> (sjekket 12.04.2023).
- [61] Fjernkontrollen. *Statkraft Varme - Norsk Fjernvarme*. no. 2021. URL: <https://www.fjernkontrollen.no/statkraft-varme/> (sjekket 21.02.2023).
- [62] Enova. *Luft-til-vann-varmepumpe — Søk om støtte*. nb-NO. URL: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/luft-til-vann-varmepumpe/> (sjekket 24.02.2023).
- [63] UngEnergi. *Hvordan fungerer varmepumpen? — UngEnergi*. nb. Feb. 2022. URL: <https://unge Energi.no/miljoteknologi/bygg/varmepumpe/> (sjekket 24.02.2023).
- [64] L C Felius. *Leveransebeskrivelse - RIE*. no. Trøndelag fylkeskommune, 2023.
- [65] Forbrukerrådet. *Norske årsmiddeltemperaturer: I alfabetisk rekkefølge*. Tekn. rapp. 2015. URL: https://fil.forbrukerradet.no/wp-content/uploads/2015/11/VP_2015_%C3%85rsmiddel_Alfabetisk.pdf (sjekket 13.04.2023).
- [66] NRK og Meteorologisk institutt. *Historiske værdata for Trondheim som graf - Siste 13 måneder*. nb-no. URL: <https://www.yr.no/nb/historikk/graf/1-211102/Norge/Tr%C3%B8ndelag/Trondheim/Trondheim?q=siste-13-m%C3%A5neder> (sjekket 25.04.2023).
- [67] L C Felius, J Brozovsky og F Smits. *Strategies for Low CO₂-emission Schools in Norway - CONFIDENTIAL*. en. Rambøll Norge AS, Kobbegate 2, 7042 Trondheim, Norway, 2023.
- [68] Trondheim Kommune og Husbanken. *Nye Heimdal vgs —*. nb-NO. URL: <https://saupstad.no/artikkel/nye-heimdal-vgs/> (sjekket 25.04.2023).
- [69] The Research Centre on Zero Emission Buildings. *Heimdal VGS*. URL: <http://www.zeb.no/index.php/no/pilotprosjekter/265-heimdal-vgs-no> (sjekket 12.04.2023).
- [70] Norwegian Green Building Council Grønn byggallianse. *BREEAM-prosjekter*. nb-NO. URL: <https://byggalliansen.no/kunnskapssenter/kunnskapssenter-prosjekter/breeam-sertifiserte-prosjekter/> (sjekket 24.04.2023).
- [71] Trond Joelson. *Horten videregående skole*. no. Section: Bygg. Aug. 2019. URL: <https://www.bygg.no/article/1402196/> (sjekket 12.04.2023).
- [72] LINK Arkitektur. *Horten videregående skole — LINK Arkitektur*. nb. URL: <https://linkarkitektur.com/no/prosjekter/horten-videregaende-skole> (sjekket 25.04.2023).
- [73] Troms og Finnmark fylkeskommune. *Ishavsbyen skole klar for bygging - Troms og Finnmark fylkeskommune*. URL: <https://www.tffk.no/aktuelt/ishavsbyen-skole-klar-for-bygging.36086.aspx> (sjekket 12.04.2023).
- [74] NORSK SOLENERGIFORENING. *Hvorfor solenergi?* en-US. URL: <https://www.solenergi.no/hvorfor-solenergi> (sjekket 30.03.2023).
- [75] Meteorologisk institutt. *Gode forhold for solceller i Norge — Meteorologisk institutt*. no. URL: <https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/gode-forhold-for-solceller-i-norge?publisherId=17846853&releaseld=17934921> (sjekket 10.04.2023).
-

-
- [76] Unbound Solar. *Tilt & Azimuth Angle: Finding the Optimal Angle to Mount Your Solar Panels*. en-US. Running Time: 140. Nov. 2018. URL: <https://unboundsolar.com/blog/solar-panel-azimuth-angle> (sjekket 23.04.2023).
- [77] NORSK SOLENERGIFORENING. *Solfangere*. en-US. URL: <https://www.solenergi.no/solvarme> (sjekket 10.04.2023).
- [78] UngEnergi. *Solceller — UngEnergi*. nb. URL: <https://ungenergi.no/energikilder/solenergi/solceller/> (sjekket 10.04.2023).
- [79] Susoltech mfl. *Muligheter og utfordringer knyttet til Bygningsintegreerte solceller (BIPV) i Norge 2018*. Tekn. rapp. 2018. URL: <http://bipvno.no/publications/BIPViNorge2018.pdf> (sjekket 21.12.2023).
- [80] Solcellespesialisten. *Solceller til næringsbygg*. no. URL: <https://www.solcellespesialisten.no/solceller-til-naeringsbygg> (sjekket 21.02.2023).
- [81] Nora Schjøth Bunkholt mfl. *Bruk av bygningsintegreerte solceller (BIPV)*. Tekn. rapp. Jun. 2021. URL: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2766886/Bruk%20av%20byggningsintegreerte%20solceller%20i%20Norge.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (sjekket 21.02.2023).
- [82] Sintef. *Det er også byggetekniske krav til solcelleanlegg*. no. Des. 2022. URL: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2022/det-er-ogsaa-byggetekniske-krav-til-solcelleanlegg/> (sjekket 10.04.2023).
- [83] eia. *Solar energy and the environment - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-energy-and-the-environment.php> (sjekket 10.04.2023).
- [84] EPD Norge. *Hva er en EPD?* no. Apr. 2015. URL: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/> (sjekket 10.04.2023).
- [85] Antonin d'Aviau de Ternay Kapstan. *Environmental Product Declaration: N-Peak 2*. Tekn. rapp. NEPD-3422-2033-EN. Apr. 2022. URL: https://www.epd-norge.no/getfile.php/1323345-1649065418/EPDer/Byggevarer/NEPD-3422-2033_N-Peak-2.pdf (sjekket 10.04.2023).
- [86] Antonin d'Aviau de Ternay Kapstan. *Environmental Product Declaration: Alpha Pure*. Tekn. rapp. NEPD-3420-2033-EN. Apr. 2022. URL: https://www.epd-norge.no/getfile.php/1323336-1649065076/EPDer/Byggevarer/NEPD-3420-2033_Alpha-Pure.pdf (sjekket 10.04.2023).
- [87] Antonin d'Aviau de Ternay Kapstan. *Environmental Product Declaration: TwinPeak 4*. Tekn. rapp. NEPD-3421-2033-EN. Apr. 2022. URL: https://www.epd-norge.no/getfile.php/1323339-1649065192/EPDer/Byggevarer/NEPD-3421-2033_TwinPeak-4.pdf (sjekket 10.04.2023).
- [88] EVEA. *ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION: Maxeon 3*. Tekn. rapp. NEPD-3087-1726-EN. Sep. 2021. URL: https://www.epd-norge.no/getfile.php/1320455-1631198480/EPDer/Byggevarer/NEPD-3087-1726_MAXEON-3-MONO-CRYSTALLINE-PHOTOVOLTAIC-MODULE.pdf (sjekket 10.04.2023).
- [89] Parikhit Sinha. *ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION: Series 6*. Tekn. rapp. NEPD-2993-1671-EN. Aug. 2021. URL: https://www.epd-norge.no/getfile.php/1319702-1628246534/EPDer/Byggevarer/NEPD-2993-1671_Series-6-Photovoltaic-Module.pdf (sjekket 10.04.2023).
- [90] NORSK SOLENERGIFORENING. *Solceller*. en-US. URL: <https://www.solenergi.no/solstrm> (sjekket 10.04.2023).
- [91] Battle Born Batteries. *What's The Difference Between Wiring Solar Panels in Series or Parallel?* en-US. Aug. 2021. URL: <https://battlebornbatteries.com/solar-panels-in-series-or-parallel/> (sjekket 18.04.2023).
- [92] Wayne Storr. *Bypass Diodes in Solar Panels and Arrays*. en. Aug. 2013. URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html> (sjekket 25.04.2023).
-

-
- [93] Energy.gov. *Solar Integration: Inverters and Grid Services Basics*. en. URL: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-integration-inverters-and-grid-services-basics> (sjekket 25.04.2023).
- [94] Otovo. *Inverter solceller - vekselretter til solcelleanlegg*. nb-NO. Mar. 2023. URL: <https://www.otovo.no/blog/solcellepanel-solceller/vekselretter-slik-fungerer-det/> (sjekket 15.05.2023).
- [95] solarnipaneli. *Slik Dimensjonerer Du En Inverter: Solar Inverter Dimensjonering Forklart*. en-us. Section: Solcellepaneler. Okt. 2022. URL: <https://solarnipaneli.energy/no/slik-dimensjonerer-du-en-inverter-solar-inverter-dimensjonering-forklart/> (sjekket 15.05.2023).
- [96] SMA. *PV Inverters - Basic Facts for Planning PV Systems — SMA Solar*. URL: <https://www.sma.de/en/partners/knowledgebase/pv-inverters-basic-facts-for-planning-pv-systems> (sjekket 23.04.2023).
- [97] Kristian Bjørndal Vigsø Tveiten. *Solceller i lavspenningsnettet*. Tekn. rapp. Aug. 2019. URL: <https://www.nve.no/media/15051/sommerprosjekt-2019.pdf> (sjekket 23.04.2023).
- [98] Knut A. Rosvold. *nettstasjon*. no. Sep. 2019. URL: <https://snl.no/nettstasjon> (sjekket 25.04.2023).
- [99] Eco Stor. *Slik går solceller og batteri hånd i hånd*. no. URL: <https://www.eco-stor.com/no/blog/slik-g%C3%A5r-solceller-og-batteri-h%C3%A5nd-i-h%C3%A5nd> (sjekket 11.04.2023).
- [100] Maren Istad. *Data fra HAN-porten på smarte strømmålere (AMS) kan gi deg verdifull informasjon*. nb-NO. Nov. 2022. URL: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/han-porten-smarte-strømmålere-ams/> (sjekket 15.04.2023).
- [101] Caverion. *SD-anlegg*. no. URL: <https://www.caverion.no/global/tjenestekatalog/sd-anlegg/> (sjekket 20.04.2023).
- [102] Eco Stor. *Batterisystem i næringsbygg, en gamechanger for strømstyring*. 2022. URL: <https://www.eco-stor.com/no/blogg/batterisystem-i-n%C3%A6ringsbygg-en-gamechanger-for-str%C3%B8mstyring> (sjekket 20.04.2023).
- [103] AE - Alternative Energy Solar. *Peak shaving - Off grid system*. en-US. Jun. 2021. URL: <https://ae-solar.com/peak-shaving-off-grid-system/> (sjekket 24.04.2023).
- [104] Kjell Sand mfl. *Veileder for kost/nytte-vurderinger ved integrasjon av batteri i distribusjonsnettet*. Tekn. rapp. Nov. 2020. URL: https://lede.no/getfile.php/1335589-1612786176/Lede/Dokumenter/Rapport_Veileder%20for%20kostnytte-vurderinger%20ved%20integrasjon%20av%20batteri%20i%20distribusjonsnettet.pdf (sjekket 14.05.2023).
- [105] F Vullum-Bruer og K O P Bjørgen og H Kauko og H Svendsen og A Sevault. *Konseptutredning – Fleksible løsninger for energilagring ved Tiller vgs*. no. SINTEF Energi AS, 2021.
- [106] Panasonic Eneloop. *What is battery self-discharge? And how do you counter it? — Panasonic eneloop*. URL: <https://www.panasonic-eneloop.eu/en/news/what-battery-self-discharge-and-how-do-you-counter-it> (sjekket 19.04.2023).
- [107] EnergySage. *Solar battery buyer's guide*. en. URL: <https://www.energysage.com/solar-batteries/> (sjekket 20.04.2023).
- [108] Ragni Fjellgaard Mikalsen, Christian Sesseng og Karolina Storesund. «SAFETY & TRANSPORT RISE FIRE RESEARCH». en. I: (). URL: https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/rapporter/andre-rapporter/rise-rapport-2020_43_evaluering-av-brann-i-parkeringshus-pa-stavanger-lufthavn-sola_2020-06-26.pdf.
- [109] UL Research Institutes. *What Are Lithium-Ion Batteries? — UL Research Institutes*. en. URL: <https://ul.org/research/electrochemical-safety/getting-started-electrochemical-safety/what-are-lithium-ion> (sjekket 24.04.2023).
- [110] Lianne Frith. *A Closer Look at Lithium Iron Phosphate Batteries, Tesla's New Choice of Battery - News*. en. 2021. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/news/a-closer-look-at-lithium-iron-phosphate-batteries-teslas-new-choice-of-battery/> (sjekket 08.05.2023).
-

-
- [111] Aric Shelby. *How Are Lithium Iron Phosphate Batteries made?* en. 2021. URL: <https://rebelbatteries.com/blogs/lithium-iron-phosphate/how-are-lithium-iron-phosphate-batteries-made> (sjekket 08.05.2023).
- [112] Sinovoltaics. *LFP Battery Technology*. en. URL: <https://sinovoltaics.com/energy-storage/batteries/lfp-battery/> (sjekket 11.05.2023).
- [113] Nigel Taylor. *Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxides*. en-US. Feb. 2022. URL: <https://www.batterydesign.net/lithium-nickel-manganese-cobalt-oxides/> (sjekket 08.05.2023).
- [114] Jörn Jürgens. *This is why NCM is the preferable Cathode material for Li-ion batteries*. en-GB. Aug. 2019. URL: <https://lghomebatteryblog.eu/en/this-is-why-ncm-is-the-preferable-cathode-material-for-li-ion-batteries/> (sjekket 08.05.2023).
- [115] Visblue. *Vanadium Redox Flow Battery Life Cycle Assessment*. en. Visblue, 2023.
- [116] Green Car Congress. *Sumitomo Electric demoing ESS for power grid in California; US' largest redox flow battery system*. URL: <https://www.greencarcongress.com/2017/03/20170317-sei.html> (sjekket 25.04.2023).
- [117] Fjordkraft. *Snart kan du lagre solstrøm, uten batteri*. URL: <https://www.fjordkraft.no/pressemeldinger/snart-kan-du-lagre-solstrom-uten-batteri/> (sjekket 19.04.2023).
- [118] Alexis Sevault. *What are Phase Change Materials? (Will they be the next big thing in Norway?)* en-GB. Aug. 2018. URL: <https://blog.sintef.com/sintefenergy/energy-efficiency/phase-change-materials-pcm/> (sjekket 14.04.2023).
- [119] SISSEL FANTOFT. *Bærekraftige batterier*. nb-NO. Mai 2019. URL: <https://renas.no/baerekraftige-batterier/> (sjekket 16.04.2023).
- [120] Frida Vullum-Bruer. *Hvordan kan du bruke stasjonære batterier med eller uten solcellepanel?* nb-NO. Okt. 2022. URL: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/hvordan-kan-du-bruke-stasjonære-batterier-med-eller-uten-solcellepanel/> (sjekket 15.04.2023).
- [121] Regjeringen - Kommisjonen. *Batteriforordningen*. no. EOSnotat. Publisher: regjeringen.no. Jan. 2021. URL: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2021/jan/batteriforordningen/id2828700/> (sjekket 14.05.2023).
- [122] Nashvinder Singh. *ENERGY MANAGEMENT SYSTEM (EMS) ELABORATED*. en-us. Feb. 2017. URL: <https://blog.norcalcontrols.net/energy-management-system-ems-ellaborated> (sjekket 05.05.2023).
- [123] Nashvinder Singh. *BESS Basics: Battery Energy Storage Systems for PV-Solar*. en-us. Feb. 2017. URL: <https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-pv-solar> (sjekket 08.05.2023).
- [124] Skatteetaten. *Elektrisk kraft – fritak for fornybar energi som brukes på samme eiendom*. no. URL: <https://www.skatteetaten.no/rettskilder/type/horinger/elektrisk-kraft--fritak-for-fornybar-energi-som-brukes-pa-samme-eiendom/> (sjekket 20.04.2023).
- [125] Kromatix. *Kromatix: Model KR 4/10 GG44 Kromatix*. URL: <https://kromatix.com/wp-content/uploads/2022/11/2022-11-15-datasheets-KR-4-10-GG44.pdf> (sjekket 13.04.2023).
- [126] Georg Hagen. *About solar cells*. URL: <https://www.material.ntnu.no/solcelldata/aboutsolarcells.php> (sjekket 02.05.2023).
- [127] K. Edem N'Tsoukpoe mfl. «A review on long-term sorption solar energy storage». en. I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13.9 (des. 2009), s. 2385–2396. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2009.05.008. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001129> (sjekket 10.05.2023).
- [128] Bryte Batteries AS. *VisFlow 10kW indoor module - data sheet*. en. VisBlue, 2023.
-

-
- [129] Bryte Batteries AS. *Kravspesifikasjoner for installasjon av flow-batteri 10 kW /40 kWh*. no. Bryte, 2023.
- [130] Bryte Batteries. en. URL: <https://www.brytebatteries.com/solution> (sjekket 24.04.2023).
- [131] Pixii. *Introduksjon til Pixii*. en-US. URL: <https://www.pixii.com/about/> (sjekket 27.04.2023).
- [132] Dave Murden. *What is a Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) Battery: Properties, Advantages & Alternatives*. en-GB. Mar. 2022. URL: <https://ecotreelithium.co.uk/news/what-are-lifepo4-batteries/> (sjekket 15.05.2023).
- [133] Pixii. *Pixii PowerShaper – Industrial*. en-US. URL: <https://www.pixii.com/pixii-powershaper-2-2/> (sjekket 24.04.2023).
- [134] Birgit Risholt Seniorforsker. *Er litiumbatterier brannfarlige?* no. Jun. 2021. URL: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/er-litiumbatterier-brannfarlige/> (sjekket 10.05.2023).
- [135] Renogy. *Choosing The Best Solar Battery: AGM vs. Lithium Battery*. en. 2022. URL: <https://au.renogy.com/blog/choosing-the-best-solar-battery-agm-vs-lithium-battery/> (sjekket 14.04.2023).
- [136] Pixii. *Pixii Power Shaper ID - Flexible grid tied indoor energy storage system up to 48kW*. en. URL: https://www.pixii.com/wp-content/uploads/2023/04/2023-04-24_Datasheet-PowerShaper-ID.pdf (sjekket 27.04.2023).
- [137] Qiang Lu mfl. «Life Cycle Assessment of Electric Vehicle Power Battery». en. I: *Materials Science Forum* 847 (2016). Publisher: Trans Tech Publications Ltd, s. 403–410. ISSN: 1662-9752. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.847.403. URL: <https://www.scientific.net/MSF.847.403> (sjekket 28.04.2023).
- [138] Jiawei Quan mfl. «Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies». en. I: *Science of The Total Environment* 819 (mai 2022), s. 153105. ISSN: 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153105. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722001954> (sjekket 28.04.2023).
- [139] Evyon. *Introduksjon til Evyon*. en. URL: <https://www.evyon.com/about/> (sjekket 28.04.2023).
- [140] Evyon. *Commercial and Industrial Battery Energy Storage System datasheet*. en. 2023.
- [141] Evyon. *Solutions*. en. URL: <https://www.evyon.com/solutions/> (sjekket 24.04.2023).
- [142] KACO new energy. *Blueplanet gridsave 50.0 TL3-S kaco-newenergy.com. Bidirectional battery inverter*. en. 2023. URL: <https://kaco-newenergy.com/products/blueplanet-gridsave-50.0-TL3-S/>.
- [143] REFU energy. *REFUstore 50K-100K. The next generation of bidirectional high power battery inverters*. en. 2023. URL: https://refu.com/wp-content/uploads/2021/09/20200303_REFUstore_50K...100K_Datasheet_EN_V06_screen.pdf.
- [144] M Azevedo mfl. *Lithium and cobalt, a tale of two commodities*. McKinsey & Company. en. 2018. URL: https://www.mckinsey.com/~/_media/mckinsey/industries/metals%20and%20mining/our%20insights/lithium%20and%20cobalt%20a%20tale%20of%20two%20commodities/lithium-and-cobalt-a-tale-of-two-commodities.pdf.
- [145] Mitavachan Hiremath, Karen Derendorf og Thomas Vogt. «Comparative life cycle assessment of battery storage systems for stationary applications». eng. I: *Environmental Science & Technology* 49.8 (apr. 2015), s. 4825–4833. ISSN: 1520-5851. DOI: 10.1021/es504572q.
- [146] Bin Huang mfl. «Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives». en. I: *Journal of Power Sources* 399 (sep. 2018), s. 274–286. ISSN: 0378-7753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.116. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775318308498> (sjekket 02.05.2023).
- [147] Olav A. Øvrebø. *Live-data: Strøm og CO₂*. no. Section: klimavakten. Apr. 2023. URL: <https://energiogklima.no/klimavakten/live-data-strom-og-co2/> (sjekket 13.05.2023).
-

-
- [148] NVE. *Hvor kommer strømmen fra?* - NVE. no. URL: <https://www.nve.no/energi/energisystem/kraftproduksjon/hvor-kommer-stroemmen-fra/> (sjekket 02.05.2023).
- [149] NAV. *Lov om produksjon, omforming, overføring, omsetning, fordeling og bruk av energi m.m. (energiloven)* - Lovdata. URL: <https://lovdata.no/nav/lov/1990-06-29-50/kap5> (sjekket 02.05.2023).
- [150] Arne Førland-Lasen, Katharina Th. Bramslev og Erik A. Hammer. *Nullutslippsbygg -er det mulig?* Tekn. rapp. Sep. 2013. URL: <https://byggalliansen.no/wp-content/uploads/2018/11/Nullutslippsbygg-Veileder.pdf> (sjekket 25.04.2023).
- [151] Neotemp. *Annex 03-H/C*. Tekn. rapp. URL: <https://static1.squarespace.com/static/631f28fbab8f4f6cce44a498/t/63f8ba26917d2d73e7807dd2/1677244967157/Annex+03-HC+NO.pdf> (sjekket 01.05.2023).
- [152] Solenergiklyngen - The Norwegian Solar Energy Cluster. *Om solenergi – Solenergiklyngen The Norwegian Solar Energy Cluster*{:}. 2021. URL: <https://solenergiklyngen.no/omsolenergi/> (sjekket 10.05.2023).
- [153] International Energy Agency. *IEA SHC — Task 51 — IEA SHC — Task 51*. 2017. URL: <https://task51.iea-shc.org/> (sjekket 10.05.2023).
- [154] J. Sun og J. J. Jasieniak. «Semi-transparent solar cells». en. I: *Journal of Physics D: Applied Physics* 50.9 (feb. 2017). Publisher: IOP Publishing, s. 093001. ISSN: 0022-3727. DOI: 10.1088/1361-6463/aa53d7. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aa53d7/meta> (sjekket 10.05.2023).
- [155] Ali Ghaffarianhoseini mfl. «Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs)». en. I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (jul. 2016), s. 1052–1065. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.130. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116001866> (sjekket 10.05.2023).

Vedlegg

A Møtereferat Torger Mjønes

Referat fra møte med fagsjef og gruppeleder for bærekraftige bygg i Trøndelag fylkeskommune.

Dato: 12.04.23 kl 10:00

Sted: Teams

Til stede: Torger Mjønes, Laurina Felius, Nadia Supinska og Jannike Økland.

Utsagnene er sortert etter tema, ikke etter når de ble sagt.

Heimdal vgs

Det ble tatt utgangspunkt i den typiske energitrekanten. Man måtte tenke nytt for å få til netto null gjennom året. Det hele begynte med FME ZEB i 2013 med Heimdal vgs som pilotprosjekt. Målet var å oppnå ZEB-O +20% M (materialer). Fant fort ut at det ikke var hensiktsmessig og at det var litt for ambisiøst. Klarte likevel ZEB-O til slutt. Det har vært fokus på å redusere klimafotavtrykket i senere årene også og ikke kun der og da. Derfor spilte ombruk av materialer en stor og viktig rolle. I alle slike prosjekter er det også viktig å unngå å ødelegge nyere bygg (for eksempel 20 år gamle bygg) og heller fokusere på renovering. Gjenbruk/bruk av materialer har full uttelling i klimafotavtrykket i dag, og energi gir uttelling lenger frem i tid, så man må vurdere hva som prioriteres, og aller helst fokusere på begge. Byggene skal ha levetid på minst 60 år og skal gjøre det bedre enn referansebygg fra 2015, så det er viktig å ha det i tankene. FNs klimamål har vært en motivasjon for ambisiøse mål.

Tiller vgs:

Det ble bestemt at det blir mye ombygging og ombruk av materialer istedenfor bare riving, da det var sett på som det mest miljøvennlig. Veldig mye solceller som måtte til for å få ZEB-O. Det er langt til fjellet fra Tiller vgs (hvert fall over 200m som gjør at det ikke lenger er lønnsomt) så geotermisk varmepumpe. Av den grunn ble det valgt fjernvarme i stedet. For klimafotavtrykkets del og kostnader ble ombruk av batteri det beste alternativet. Det var viktig å ha sensorer slik at det ikke blir for mye varme i batterirommet. Veldig viktig å ha ekspansjonssone og god ventilering. Det ble mye samtale med brannrådgiver. EcoStor var leverandør av gjenbrukte batterier, dette ble hentet gjennom totalentreprenøren HENT AS. 20stk Nissan Leaf batterier. SINTEF Energi bidro til å få Enova støtte til prosjektet. Det var også interessant med saltvannsbatterier og vanadiumsbatterier. EcoStor ble valgt grunnet investeringskostnader, ladesyklus til batterier og klimaavtrykk.

Skjetlein vgs:

Det skal installeres et anlegg med vanadium flytt batteri – fra Bryte. TRFK setter fokus på klimafotavtrykket fra råmaterialer og utfordrer Bryte på dette, slik at de leverer det beste resultatet. Bryte har kun levert på Sluppen hittil og det var deres pilotprosjekt. Brytes første ordentlige, store anlegg blir her. Det er et stort behov for energilagring hos Skjetlein vgs så alle ser frem til samarbeidet.

Cissi klein vgs:

Detaljert design-fase. Geobrønnløsning var aktuelt her for å ha kjernetemperatur. Fjellskole i Drammen fikk det til gjennom rådgiverfirmaet Asplan Viak, men her i Trondheim var det ikke så lett å få det til så det ble gått litt bort fra. Sesonglagring gjennom termisk lagring er meget aktuelt her, samt ved alle andre skolerelaterte prosjekter. Varmepumpe kan brukes til å lade opp utenom driftstiden. Dessverre er det litt kjøleproblematikk tilknyttet disse valgene.

Mære landbruksskole:

Dette er en nullutslippsgård. Mange av klimautfordringene er knyttet til landbrukssektoren, så hvorfor ikke bare ta tak i det rett her. FME ZEN er samarbeidspartner her og bidrar mye. Erfaring fra andre ZEN prosjekter og living lab prosjekter. En av løsningene har vært å slå sammen flere strømmålere.

Trondheim Katedralskole:

Bakgrunnen for at B-bygget velges å fjernes fremfor å renoveres er blant annet dårlig kvalitet på fasader og utforinger knyttet til takhøyde og funksjon. Bygget skal delvis bli en idrettsbygning og det stilles noe strengere krav. Det å kunne bevare konstruksjonen hadde vært det beste, men dessverre umulig her. Materialene fra B-bygget skal likevel gjenbrukes, så dette er et pluss fra klimafotavtrykks synspunktet.

Solcellene skal hovedsakelig være tilkoblet nettstasjon på 400V, altså et nytt anlegg installert av Tensio. Den gamle nettstasjonen på 230V forblir også. Solceller vil kunne levere for det meste til 400V, men også direkte til trafo på gamle 230V. Det vil si at det må være 2 strømmålere. Dette løser utfordringen med deling av egenprodusert strøm på tvers av strømmålere. Altså at skolen unngår høye avgifter tilknyttet salg og kjøp av strøm fra strømmettet.

Det er jo kun nye bygg som har krav om ZEB-O. Det er ikke samme krav på gamle bygg. Man vet hvor mye produksjonen fra solceller må være for å oppnå ZEB-O, men det er ikke oppgitt at all produsert energi må brukes i nybyggene. Derfor er løsningen med 230V og 400V den beste.

Termisk energi kan deles til nabo, så det kan bli sett litt nærmere på. Elektrisk er ikke like aktuelt grunnet avgifter. Det er også snakk om en ny plusskundeordning som inkluderer næringsbygg mer, men det er fortsatt ikke aktuelt å dele til naboer med annet gårdsnummer.

Fjernvarmenettet i Trondheim har høy temperatur, på cirka 100grader. Det er dermed vanskelig å levere varme tilbake på nettet, da temperaturen fra Katta kan være lavere. Med andre ord vil ikke dette være lønnsomt for noen. Det er potensiale for energiutveksling med nabobygg. Det er da kun snakk om termisk energi siden elektrisk ikke er lett å få til grunnet lovverket.

Fosen vgs:

Prosjektet er i tidlig designfase, så mye er uavklart. Ganske likt som Trondheim Katedralskole med tanke på fasadebaserte solceller. De vil muligens kunne hente erfaringsdata og informasjon fra Katta.

Energilagring:

Elektrisk energilagring (vanlige batterier) bidrar til døgntjevning. Det er ikke lett å lagre overskuddsenergien til vinteren med dagens teknologi.

PCM (Phase Change Material - faseendringsmaterialer) er en form for termisk energilagring, dette fungerer likevel best for døgntjevning også. Man kan få PCM med mange ulike temperaturer, så det er et alternativ.

Hydrogenlagring er veldig smart, men fungerer "dessverre" best der energi må fraktes i for eksempel båt eller lastebil, ikke like bra for bruk i bygninger.

Vannmagasin er de beste batteriene som finnes, men overføring er ikke lett. Effekttopper hjelper ikke til. Lokale batterier vil være spennende konsept da det at det kan redusere effekttopper i noen timer hjelper masse for overføringskapasitet.

Batteri er fleksibilitet markedet for gridet.

Solceller:

Utviklingen i solceller går veldig raskt. Solcelleanlegg er brukt på flere av prosjektene til TRFK, blant annet Heimdal, Skjetlein, Mære, Tiller. På Johan Bojer er det også en fasadeløsning allerede, denne er rettet mot sør og sjøen. Sjøen skal kunne bidra med litt refleksjon og dermed bedre utnyttelse av fasadeløsningen. Det er jo nytt konsept med fasade på Katta også. Disse har en annen produksjonsprofil enn på taket. Den er lavere på sommeren, men bedre på vår og høst, slik at det lønner seg likevel. Fasadeløsninger vil nok implementeres oftere, men det er et kostnadsspørsmål, da de er dyrere og ofte produserer mindre enn de på taket. I tillegg er ikke arkitekter så glade for solceller på fasadeløsninger, da det begrenser dem litt. Det er viktig med

en fin balanse, vise respekt til alle fagfelt. Man må også tenke på at “Historie møter fremtid”. Dette er et argument for at det blir brukt fasadesolceller som ikke er like effektive, men som likevel får bygget til å se litt eldre ut. Fint kompromiss.

Mye av utfordringen med solcellevalg i det siste har vært arbeidsvilkår knyttet til produksjon av solceller og hvordan betydning dette har for ulike prosjekter. Det er fokus på å bruke leverandører som har gode arbeidsvilkår for sine ansatte.

EPC:

Torger Mjønes ble tidligere omtalt som arkitekten bak EPC kontrakt i nybygg. Han sier at han støtte på altfor mange bygg som så bra ut på papiret, men ikke i virkeligheten. Flere ting er blitt lovet av entreprenører, men likevel ikke oppfylt i driftsfasen. På Heimdall traff entreprenøren SKANSKA godt med de fleste beregningene, bortsett fra varmebudsjettet. SKANSKA var da forpliktet til å ta tak i det og finne nye/andre/bedre løsninger. Begge parter opplevde det som veldig lærerikt. Betonmast på Katta skal også ha en slik kontrakt. EPC kontrakt gjør at entreprenøren har ansvar for de resultatene de har lovet de første 5 årene av bruksfasen.

ZEB skoler:

Bakgrunnen for at det er så mange skoler i TRFK som nå renoveres eller bygges til ZEB-bygg er at Norge må omdannes til et lavutslippssamfunn. TRFK synes det er spennende å utfordre næringslivet og utfordre entreprenører. De kan bruke sin makt som byggherre til å stille ambisiøse krav og dermed bidra til omstillingen.

EU har sendt et krav til høring, som vil mest sannsynlig gå gjennom, om at alle offentlige nybygg skal være utslippsfrie innen 2027. Dette er en motivasjon for å satse på ZEB-O. Det er ikke sagt i hvor stor grad Norge vil implementere disse lovene, men det å begynne nå gjør Norge i hvert fall forberedt, og det er uansett veldig bra for miljøet. Spennende å være blant de første som driver og utforsker dette. Det er utfordrende nok å nå ZEB-O krav og det er ganske ambisiøse mål, så det er ingen planer om pluss hus enda.

B Møtereferat Jonas Buan

Referat fra møte med leder for teamet med energirådgivere i HENT sin avdeling for Teknologi og bærekraft.

Dato: 14.02.23 kl 14:00

Sted: HENT AS, Vestre Rosten 69, 7072 Heimdal

Til stede: Jonas Buan, Pernille Dolmen, Nadia Supinska, Marita Rendedal og Jannike Økland.

Utsagnene er sortert etter tema, ikke etter når de ble sagt.

Generell presentasjon av prosjektet Tiller vgs:

Det ble installert et solcelleanlegg på 3200m² som er beregnet til å produsere 461 500 kWh/år. Det er en utfordring knyttet til overproduksjonen på sommerhalvåret. Plusskundeordningen dekker kun deling på opptil 100kWp på samme gårds- og bruksnummer. Politikken tilknyttet deling av strøm er vanskelig og bør gjøres noe med.

Batterisystem på Tiller:

Det er viktig med et batterirom med brannsikkerhet og som oppfyller nødvendige krav. Brannvesenet er ikke så imponert over løsningen på Tiller grunnet plassering i kjelleren. Det var totalt 60 oppnådde krav, blant disse var digital overvåkning, ventilasjon, røyklukking, trykkavlastning, svakere vegg hvor batteriet skal blåse ut, trykkavlastningskammer. Det aller beste hadde vært å ha batterirommet i et bygg utenfor, helt litt lenger unna. Utviklingen i samfunnet tilknyttet bruk av batterier og brannfare knyttet til dette er langt forbi regelverket.

Enova ga dette prosjektet støtte på 40%. De brukte 20-25 stykk 450kW, Nissan Leaf batterier (4. generasjons), 100kW muligens ettersom de er brukte. Levetid til disse er det umulig å si noe om. Det er risiko tilknyttet gjenbruk av batterier. EcoStor som leverte batterier i dette tilfellet gir garanti i 10 år, gjennom en leasingavtale (300k). Kostander var 2.9 millioner kroner for hele systemet, hvorav 1.5 millioner kroner var batterier. Pengene gikk også til ventilasjon, instillasjon, elektro, programmering (softwarebiten var dyrt) og sikkerhetsmekanismer. Strømpriser er blitt mye høyere i det siste, så det er en god motivasjon for bruk av energilagring. Det er viktig å ikke tappe batterier for mye. En tanke knyttet til sikkerhet: Hvis det er lov å ha en Tesla (eller en annen el-bil) i en garasje, så bør det være lov med et teslabatteri i garasjen også. Beregnet at det er ca. 5-6000kr per kWh.

Batterier og solceller

Vestby Storsenter er et annet prosjekt som ligner som HENT jobber med nå. Planen er å bruke bedriften Evyon som da leverer Mercedes batterier, 1000kWh. Besparelsen er potensielt på 146 tonn CO₂-ekv sammenliknet med nytt litium-ione batteri. Dette er et frekvensreguleringsmarked. IBC SOLAR aerofix kan brukes som bæreelement. 10-15 graders helning er vanligst og billig, men produserer ikke like mye. Det beste er å prosjektere solceller med helning på 36 grader sørvendt.

C Møtereferat Anders Sørgård

Referat fra møte med energirådgiver i HENT.

Dato: 14.02.23 kl 15:00

Sted: HENT AS, Vestre Rosten 69, 7072 Heimdal

Til stede: Anders Sørgård, Pernille Dolmen, Nadia Supinska, Marita Rendedal og Jannike Økland.

Anders jobber for det meste med solcelleprosjektering og energirådgivning. Dette møtet handler dermed mest om solceller. Utsagnene er sortert etter tema, ikke etter når de ble sagt.

Solcelleprosjektering:

Det vanligste er å prosjektere solceller med 10 grader helning på flatt tak, øst-vest vendt. Da dette er bransjestandard, arealbesparende og kostnadseffektivt. Fasade er kostnadseffektiv dersom det er stålprofiler med solceller oppå, men det velges ofte BIPV som er dyrere. BIPV erstatter fasade så det sparer på andre kostnader. Ved montering på fasaden bores det på utsiden av klimaskallet. Det vil derfor ikke bli fuktrelaterede problemer.

Det beste er å velge en strenginverter. Enkelt og greit å bruke og vedlikeholde. Det kan være en tanke å velge halvcellepaneler. Greit å ha med bipass moduler. PVsyst gir bra estimat og gjør gode beregninger, så det kan absolutt brukes videre.

Soiling/tilsmussing - snø, andre tap over paneler, skygge fra horisonten, skygge fra andre bygg, teknisk rom på bygget, kabeltap osv. Det er viktig å tenke på.

Valg av solceller:

I dag er det for det meste ZEB nivå som setter føringer i prosjekter. Valget skal være mest miljøvennlig og bærekraftig. Det er lurt å bruke solceller med EPD-er. Sunpower har det beste alternativet klimagassmessig, men er også dyrest. Man kan også bruke EPD Italy. Protan har veileder for hva som er best å gjøre ved montering på taket. Kinesiske paneler er billigst da de koster cirka 1500/1600kr/m², ferdig på DC siden. Sunpower koster omtrent 3500kr/m². Sunpower har effektivitet på cirka 22/23%.

Det er veldig viktig med sosialbærekraft. Flere har fokus på det nå. Arbeidsvilkår til de som produserer er viktige å se på også, da flere jobber i dårlige vilkår. In broad daylight – UIB og Rema 1000 lager.

Det er snart ikke så mye mer silisium å hente, alternativt – Cadmiumtellurid (CdTe)– Si tandem er også spennende. Dette er i lab stadiet, men er gitt over 30% virkningsgrad.

Montering av solceller:

Mangen i bransjen vil gå vekk fra balansering. Det hjelper med å kvitte seg med 50% av vekten til anlegget. Balansering krever mange tonn med stein. Bygningsfysikere er redd for fukt i bygg dersom man skal borre.

Avstand til takkant på flatt tak, etter forskrift 712C, 1 meter unna ytterkant. Dette har med sikkerhet å gjøre og vil også gjøre det mulig for brannvesenet å komme seg frem. En meters gap midt på hver 40 meter tillater 1 meter unna ytterkant. Det er vanlig å ha 3 meter fra takkanten for da slipper man å tenke så mye på sikkerhet. Man kan bygge rett ved et ventilasjonsanlegg, med bør være obs på skygge.

Generelle tips:

Når man skal snakke med solcellespesialisten bør man i forespørselen sende informasjon om hvor mye solenergi vi trenger. Se nettsiden for all informasjon som skal være med. Spikende produksjonsestimat – man bør tenke over hvor seriøst man kan ta tilbudet og helst se gjennom simuleringen. Det hender at de overestimerer. Det beste er egentlig å spørre om produksjon ved Skjetlein, for da vil estimeringen være omtrent riktig. Nøkkeltall for produksjon i Trondheim er 650 kWh/kWp.

Nøvendig produksjon/650 - vil gi den effekten man trenger.

Sammenlign tilbud fra flere leverandører. Det vil gi det beste resultatet. Vær kritisk og spør om forklaringer. Si ifra om du ikke er fornøyd med tilbudet.

Tilbudsforespørsel bør inneholde:

- Takplan
- IFC modell - tegningsunderlag
- Ventilasjon
- Produksjonsmål

D Møtereferat Ellen Loxley

Referat fra møte med Head of Growth i Bryte AS.

Dato: 18.04.23 kl. 09:00

Sted: Teams

Til stede: Ellen Loxley, Nadia Supinska, Marita Rendedal og Jannike Økland.

Utsagnene er sortert etter tema, ikke etter når de ble sagt.

Presentasjon av Bryte

Bryte Batteries er ledende innenfor flowbatterier. Dette er et nokså nytt konsept og Bryte er de som først begynte det her i Norge. Første batteriinstallasjonen deres står på kjeller på Lager 11 på Sluppen. Det er mulig å få omvisning der. Norge har fortsatt ingen store installasjoner enda.

Det er behov for lokal fleksibilitet på strømmettet i fremtiden og det må man begynne å tenke på allerede nå. Batterier er en god løsning for lokal fleksibilitet. Det er enkelt å plassere Bryte sine flowbatterier i gamle bygg og man trenger ikke å ha en spesiell branncelle rundt deres batterier. Undersøker om disse batterier eger seg til å bruke som back up strøm. Flowbatterier har bedre miljøprofil enn Li-ion batterier, og de utforsker litt mer om det i prosjektet på Skjetlein vgs. Prosjektet ferdigstilles i 2025, så de forsker fortsatt mye.

Bryte gir kunden vedlikeholdsavtale, og kunden kan også lett få oversikt over deres energi. Batterier har kapasitet på omtrent 16-18 timer. Flowbatterier er en ganske ny teknologi. Det største anlegget i verden er i Kina og det gir strøm til ca 200 000 innbyggere. Høye strømpriser er en motivasjon for flere bedrifter for høy satsing på grønn og fornybar energi. Det er smart å bruke batterier for da slipper man å betale strømleie for egenprodusert strøm.

For Bryte er det avgjørende å få flere samarbeidspartnere for å etablere seg ordentlig på det norske markedet. De vil gjerne lære opp markedet om deres måte å lagre energi på. Solenergiklyngen er blant partnere hittil. Brytes batterier kan erstatte aggregat, brukes til arbitrasje og til å kutte effektopper. Nybygg har krav på et eget batterirom, og det er ikke så dyrt å bygge et rom for flowbatterier, enn det det er for vanlig Li-ion batterier. Mange begynner å bygge ut solceller og dermed er det økt behov for energilagring.

Batterier begynner å være lønnsomme når de erstatter strømlinje på minst 300 m. De bidrar til at man kan unngå eller utsette utbygging av strømmettet. Det å bygge ut strømmettet er meget kostbart og tar lang tid, så batterier er en veldig fin løsning. De bidrar også til frekvensregulering på strømmettet. Flere leverandører jobber sammen om å hjelpe til å kunne bygge ut mer fornybar energi ved å finne gode og effektive måter å lagre energi på.

De fleste systemer med Brytes batterier har tilbakebetalingstid på cirka 12-15 år. Det er bra da batteriets levetid er på 25+ år. De kan anvendes i flere ulike sektorer, f.eks. Maritim - langstrøm for ferger. Det finnes to hovedtyper anlegg, 10kW/50kWh til å ha inne og 60kW/350kWh til å ha ute i containere. Mellom 50-70% av batterier består av vann (derfor de heter **flow** batterier), og av den grunn blir systemet brannsikkert. Disse er mest miljøvennlige batteritypen i verden.

Generell info om Brytes flowbatterier

Brytes batterier tilbyr mange sykluser. Litt færre enn Li-ion batterier, men det lønner seg fortsatt. Batterier lagrer energien/lader opp litt saktere, men tilgjengeligheten på strøm er fortsatt lik. Flowbatterier krever litt høyere investeringskostnader i starten, men dersom man ser på hele levetiden så er de billigere enn for eksempel Litium-ion batterier, da flowbatterier har lenger levetid. Disse tar litt plass, så det er viktig å ta hensyn til når man dimensjonerer rommet de skal være i og ikke minst veien disse skal inn i bygget på. LCOS på Tiller vgs (et tidligere prosjekt) viser at flowbatterier var det beste alternativet. Det ble valgt å gå med gjenbrukte batterier likevel. Det anbefales årlig vedlikehold av batterier.

Et sikkerhetsaspekt som det er viktig å tenke på er at batterier kan slippe ut litt Hydrogengass. Det bør sørges for god ventilasjon i rommet. Så lenge rommet er avlåst og godt ventilert så er det godt nok. Det er ikke behov for ekspansjonsvegg da det ikke er noe fare for eksplosjon. Det er flere sensorer på batterier som oppdager dersom noe skjer. Det er vanligst med at batterier er i et avlåst rom med temperatur på 10-30 grader. Disse batterier lønner seg ikke for langtidslagring, men er veldig lurt å bruke på dagsbasis da de kun har 0.1% tap. Det beste er å selge overskuddstrømmen ved høyere priser og tjene penger på det.

Levetiden til flowbatterier er mye lenger enn Li-ion og de kan derfor brukes i flere tiår. Når det gjelder resirkulering så er de mye mer miljøvennlige enn Li-ion, da de har forskjellige kjemikalier. Litium er vanskeligere å resirkulere. Flowbatterier er væskebasert og elektrolytten kan enkelt gjenbrukes. Gruppen får en LCA tilsendt på mail.

Trondheim Katedralskole prosjektet

Batterikapasitet på 350kWh og minimum effekt på 75kW gir 4.5 timers batteri. Det tilsvarer 7-8 moduler inne eller en kontainer ute. Gruppen får et datablad tilsendt for mer informasjon.

Det er lov å gjenbruke tabell fra side 19 i Brytes presentasjon i denne bacheloroppgaven.

Skjetlein VGS

Det prosjektet skal ferdigstilles i løpet av 2025. Det planlegges et anlegg på 30-90kWh på Skjetlein vgs. Hovedfokuset er arbitrasje og peak shaving. I tillegg sjekkes det ut muligheter for back up strøm. Flowbatteri har bedre miljøprofil enn litium ion batteri. Det blir mer fokus på miljø og dermed også utforsket mer på Skjetlein vgs. Gård er et godt sted å forske. Batteri innendørs vs

utendørs skal ses på, det har noe med trygghet aspektet å gjøre, da det er både dyr og mennesker inne. Gård er ofte plassert der nettet ikke er bra, batterier kan tilby strøm ved strømbrydd, så det passer veldig fint. Denne type batteri lader opp sakte og da har man effekt lett tilgjengelig, og tilgjengelig uansett hva som skjer med strømnettet. Skjetlein vgs får Enova støtte og er en del av prosjektet City x Change.

E Møtereferat Gabriele Lobaccaro

Referat fra møte med førsteamanuensis fra instituttet for bygg- og miljøteknikk.

Dato: 18.04.23 kl 14:30

Sted: Teams

Til stede: Gabriele Lobaccaro, Nadia Supinska, Marita Rendedal og Jannike Økland.

Utsagnene er sortert etter tema, ikke etter når de ble sagt. Gabriele Lobaccaro er oppført på NTNUs ekspertside som ekspert innen blant annet energi og miljø, klima, solceller, solenergi og solkraft. Dette møtet fokuserte hovedsakelig på solceller og solenergi.

Prosjektering på fasaden

Det finnes utrolig mange alternativer for solcelleprosjektering på fasaden. Kromatisk – som gruppen ble anbefalt av arkitektfirmaet – er et av dem. Man kan også utforske PV i glass, double skin, pikseliseringstilnærming for fasadeintegrerte fargede solceller, tradisjonelle BAPV, PV solskjerming – kan kontrollere både visuell og termisk komfort, fargede PV og mye mer. Sjekk ut rapporten task 51 (<https://task51.iea-shc.org/publications>). Den er åpen og inneholder mange gode eksempler rundt omkring i verden som allerede er i bruk. Noen av disse viser at hele fasaden kan dekkes av PV og produksjonen kan økes vesentlig.

BIPV vs BAPV

For nybygging vil det nok anbefales BIPV da det kan bli bedre integrert med fasaden, i tillegg til at kledningen kan erstattes og miljøprofilen til bygget blir derfor bedre. Historie til bygningen er også viktig, og innimellom er avgjørende for valgene som blir tatt underveis. Noen ganger vil en ikke ødelegge det arkitektoniske og derfor velger man å gå med BAPV, double skin fasade eller flere ulike løsninger. BIPV kan man få til å se gammelt ut, men det er ikke sikkert alltid det er målet. BAPV er også fint å bruke. Det er fordeler og ulemper med begge deler. BAPV vil være bedre på taket.

Fuktsikkerhet ved BIPV & BAPV

Det kan være mer problemer med BIPV, da det er enklere å montere en god ventilasjon for BAPV. Ventilasjonen bidrar til å unngå problemer med fukt og overoppheting. BIPV må tåle like mye som kledning, altså når det gjelder vær, fuktighet osv. Hvis det er godt installert, på en riktig måte, vil den gjøre jobben sin og være minst like bra.

Energilagring

Det finnes ulike løsninger rundt omkring i verden, men de to mest aktuelle i Trondheim vil nok være å enten bruke batteri eller selge overskuddsstrøm til nettet. Mange teknologier man kan bruke til energilagring, grunnet lite erfaring og kunnskap om dette temaet anbefales det litteratursøk om energilagring. Brattørkaia Powerhouse har smartgrid som deler solenergi til andre bygninger, det kan vurderes i dette prosjektet. Kombinasjon av PV og batteri er vanligst.

Parallell- vs seriekobling

Lerkendal som ble tidligere nevnt fra rapport task 51 har parallellkobling. Ved parallellkobling er det ulike string som jobber parallelt. Om en del ikke fungerer så gjør den andre det. ZEB-laboratoriet har den samme strategien. Hvis det er seriekobling så stopper alt opp, dersom kun en liten del blir ødelagt/skygget for. Det er mulig å kombinere parallelt og serie. For bygg med solceller på ulike sider av bygningskroppen er det bedre å ha parallellkobling.

Potensielle utfordringer og problemer ved bruk av solceller

Greit å ha bypass. Elektriske problemer kan oppstå. Temperatur er litt problematisk, men ikke så mye her i Norge. Lav temperatur i Norge gjør at virkningsgraden er ganske stabil. Om sommeren kan det være et problem med overoppheting av paneler i andre land. Panelene fungerer da ikke så bra og virkningsgraden går ned.

Et problem i Norge er snø. Spesielt for paneler som ligger mer eller mindre horisontalt. Aging factor, altså eldringsfaktor, er også noe å tenke på. Panelene er ikke like effektive med årene. De taper litt av sin virkningsgrad. Da må man også tenke på resirkulering av systemet og utslipp knyttet til dette.

Hvis et panel blir ødelagt, slutter som regel hele strengen å fungere. Det avhenger av inverter tilkoblingen. Flere paneler pleier som regel å være koblet på en inverter, så om et av de blir ødelagt, kobles hele strengen ut. Veldig sjeldent at man har en inverter per panel grunnet økonomi.

PVSyst

Gruppen spurte om noen tips til programmet PVSyst. Det ble anbefalt å ta kontakt med Phd kandidaten – Matteo Formolli – som per nå jobber på ZEN senteret (FME ZEN). Sett da gjerne Gabriele på kopi.

F Møtereferat Dag L. Henriksen

Referat fra møte med Business Development Manager hos Evyon AS

Dato: 26.04.23 kl 13:00

Sted: Teams

Til stede: Dag L. Henriksen, Marita Rendedal, Nadia Supinska og Jannike Økland.

Utsagnene er sortert etter tema, ikke etter når de ble sagt.

Om Evyon og deres løsninger

Hos Evyon brukes det per nå nye el-bil (EV) batterier. Disse leveres av produsenten, ettersom produsenten må være forberedt uansett etterspørsel og ha mange batterier klare. Det er likevel slik at man ikke bør ha batterier liggende på hylla, ubrukt, i en lang periode, da de ikke vil fungere like bra. Evyon kjøper da overskuddet av batterier fra leverandørens overskuddslager og bruker de til bygg og andre formål i stedet. De vil satse på gjenbrukte batterier etter hvert, men nå ser de på muligheten ved å ta i bruk nye batterier som ganske nyttig. Evyon bruker Mercedes batterier.

Levetid og gjenbruk

Batteriene har standard levetid på 6000 sykler, men mulig lenger, hvert fall ved gjenbruk. Depth of Discharge i batteriene er på ca. 85%. De anses allerede som gjenbrukte, selv om de ikke har vært brukt før. Dette er fordi de var laget for "et annet liv" før. Levetid kan sies å være mellom 10-15 år. I dag finnes det fortsatt ikke kjempegode metoder å resirkulere batterier på, men det er et stort håp om at innen 10-15 år vil det komme nye, bedre metoder, som muligens vil tillate med gjenvinning. Det er også mulig at dagens systemer kan få et tredje liv til for eksempel UPS (Uninterruptible Power Supply – avbruddsfri strømforsyning) systemer. Det må også sies at NMC batterier, sånn som denne, er enklere å gjenvinne enn LFP batterier.

Gruppen får tilsendt et foreløpig utkast til livsløpsanalyse eller lignende som kan være aktuelt ved klimafotavtryksberegninger. I tillegg får gruppen tilsendt datablad med nødvendig informasjon om Evyons batterier. Evyon får Enova støtte. Ettersom batteriene er hentet fra overskuddslager, og selv om de ikke er blitt brukt før, har de vesentlig lavere CO2 avtrykk. Antas cirka 75% lavere enn helt nye batterier.

Mercedes batterier er laget i veldig høy kvalitet, de er veldig bra og er laget etter en annen standard – tilpasset "hardkjøring" (med tanke på utlading og hurtiglading), noe som ikke blir tilfellet i bygg. Så de har fortsatt mye å gi, selv om de ikke er aktuelle for biler lenger. I bil lader de på 1C og ut på 3C. Ved stasjonær bruk er det mer vanlig med 0.8C, da er det ingen væskekjøling. I Katta prosjektet kan det være nok med 0.4C.

System på Trondheim Katedralskole

Et system på 3 strenger vil være passende for Trondheim Katedralskole. 3 strenger, AC med inverter på hver streng. En streng kan ha på 132-165kWh brutto, blir litt mindre ved netto. Netto kan man da si at levert batterikapasitet til Katta ville vært på cirka 336kWh, men total effekt på 150kW, da en inverter har 50kW og her trenges tre. Mer effekt enn det som trenges/ble foreslått av fylkeskommunen, men det kan brukes til fordel ved å eksempelvis utjevne effekttopper. Refu inverter kan være aktuelt her.

I tillegg er det EMS (Energy Management System). Solceller i seg selv er ikke så "smarte". Når det er sol så produserer de mye og sender ut masse elektroner, men når det ikke er noe sol så sender de ingenting. Det er nettopp EMS systemet som gjør batterier verdifulle. EMS måler på hovedinntaket og bestemmer om det blir eksport eller import. Man kan velge å lade opp batterier på nattetid, når strømmen er billig, og bruke den på dagstid for å kutte effekttopper. Dette er mye bedre for batterier, for de har ikke godt av ingen lading i perioden uten sol. Netteier kan komme med oversikt over effekttopper og vi kan se på lønnsomheten/kostnadsbesparelsen på det. EMS vil også bli smartere med tid. Det er en god tanke å koble EMS mot Nord Pool, slik at batterier kan kjøpe strøm når den er billig, det kommer nok en gang snart.

Evyon samarbeider en del med Geniess (<https://geniess.io/>), kan være veldig aktuelt å kontakte de for dette prosjektet, vi får en kontaktperson. Geniess formål er å gi analyse på optimalisering av et batterianlegg slik at det blir utnyttet best mulig. Tar hensyn til solcelleproduksjon, energiforbruk, effekttopper og mer. Det gir optimale batteriløsninger.

Batterier ellers er ikke så økonomiske, spesielt i Norge når det meste av elektrisitet kommer fra fornybare energikilder. Nettet er ofte billigere å bruke til lagring, og er mer optimalt enn det et batteri er. Lønner seg mer i andre land, som for eksempel Sverige.

Avtale

Batterikjøp kan være en negativladet opplevelse for bruker da det er så mye som kan gå galt. Det er mye bedre når brukeren ikke trenger å kjøpe batterier. Evyon vil satse på to løsninger for sine batterier. Det første er dynamisk garanti. De har sensorer som passer på systemet og sender ut signal når for eksempel temperaturen eller luftfuktigheten er for høy. Evyon kan da si ifra til brukeren. I tillegg kan de si ifra dersom batteriet lader ut for mye for fort. Dette vil føre til optimal bruk og at batteriet varer lenger. Det vil også føre til en positiv opplevelse for brukeren. Den andre måten er å tilby battery as service – batteritjeneste. Da betaler bruker avhengig av forbruk og behov, men det er ikke helt utviklet enda og jobbes nå med. Evyon vil etter hvert ta i bruk gjenbrukte batterier og kun bytte ut de få som er dårlig, istedenfor å bytte ut hele systemet. Man vil da ikke eie batteriet selv.

Sikkerheten ved bruk av batterier

Det er meget svakt regelverk knyttet til sikkerhet rundt batterier i bygg. Det lille som nevnes i dag er at gulv skal være sterk nok og at ventilasjon skal være tilstrekkelig, men kun det er ikke så aktuelt for litium-ion batterier. Litium-ion brenner like mye under vann, som ellers og må bare brenne ut. Det bør være veldig god ventilasjon i rommet, da det kommer veldig farlige gasser og det skal ikke mye til før de påfører skade. Det er også viktig å få ut trykket, da det ellers kan bli veldig eksplosivt. BMS måler nivåer, og det er flere andre sensorer (for eksempel temperatur). BMS kan dessverre ikke kutte ut systemet fort nok og oppdager fare for sent.

Sensorer kan fokusere på historiske data for å ha tidlig bevis på at noe galt skjer. Sensorer i rommet er viktig, og de sender varslinger at noe er feil. Gass sensor, brann sensor, temperatur sensor kobles mot SD (Sentralt Driftsanlegg). BMS og sensorer eller kan kobles mot hverandre og til SD. Det vil gi tidlig varsling. Dette er en måte å minske risiko på. Byggherre bestemmer kravene ellers.

Hadde vært en tanke å fylle naborom med vann hvis mulig, for batterier må brennes ut uansett, så da er det greit at ingenting annet tar fyr. Viktig å få ut gass og trykk. Anlegget vil ikke eksplodere om trykket holdes lavt.

Annet

Neotemp – anbefales å kontakte. Det er en norsk luft-til-vann varmepumpe med COP tall på opp mot 8. Veldig fint for tappevann, AC, og en mye bedre løsning enn fjernvarme. Brukes allerede i Norge.

FUSen fasadeløsning ved en skole i Oslo vant på Solenergiklyngen konferanse vant – kan være aktuelt å se på det for dette prosjektet også.

G Beregninger i MATLAB av COP for Annex 03-H/C

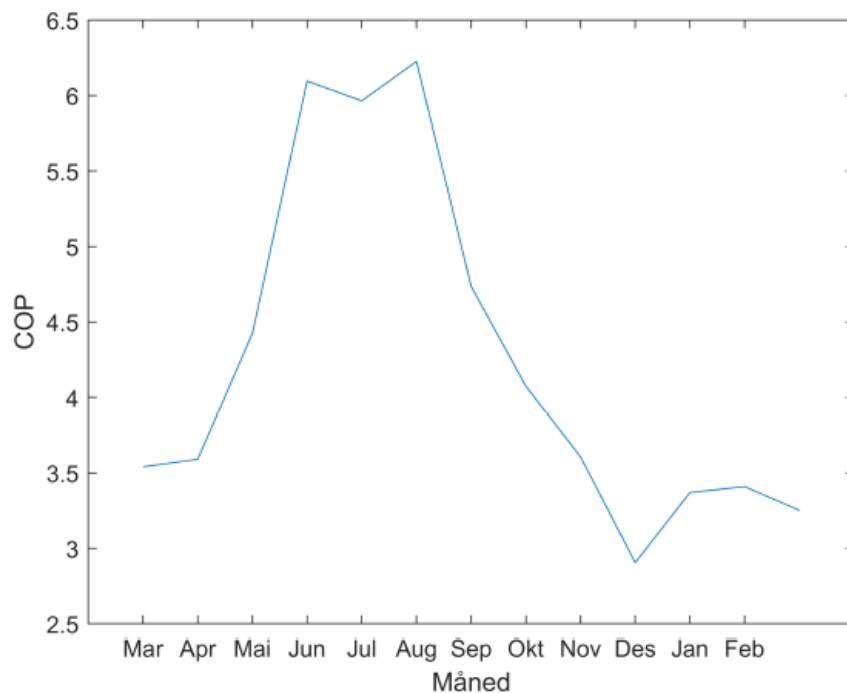
```
%Temperatur i Trondheim per måned
T_K=[2.3 2.6 8.1 12.8 12.5 13.1 9.4 6.0 2.7 -5.3 -0.9 -0.2 -3] ;
% Temperatur og COP dersom vanntemperaturen ved utgang er 45grader, -10 til 15 grader
T=[15 10 7 5 2 0 -5 -10];
COP=[7.05 4.88 4.16 3.99 3.49 3.42 3.14 2.89];
%Interpolering for å finne COP for hver måned, antatt at varmepumpen ikke kjøler
COPmars1=3.99+((3.49-3.99)/(2-5))*(T_K(1)-5);
COPapr=3.99+((3.49-3.99)/(2-5))*(T_K(2)-5);
COPmai=4.88+((4.16-4.88)/(7-10))*(T_K(3)-10);
COPjuni=7.05+((4.88-7.05)/(10-15))*(T_K(4)-15);
COPjuli=7.05+((4.88-7.05)/(10-15))*(T_K(5)-15);
COPaug=7.05+((4.88-7.05)/(10-15))*(T_K(6)-15);
COPsep=4.88+((4.16-4.88)/(7-10))*(T_K(7)-10);
COPokt=4.16+((3.99-4.16)/(5-7))*(T_K(8)-7);
COPnov=3.99+((3.49-3.99)/(2-5))*(T_K(9)-5);
COPdes=3.14+((2.89-3.14)/(-5--10))*(T_K(10)--10);
COPjan=3.42+((3.14-3.42)/(-5-0))*(T_K(11)-0);
COPfeb=3.42+((3.14-3.42)/(-5-0))*(T_K(12)-0);
COPmars2=3.42+((3.14-3.42)/(-5-0))*(T_K(13)-0);
COP_TK=[COPmars1 COPapr COPmai COPjuni COPjuli COPaug COPsep COPokt COPnov COPdes COPjan COPfe
```

```
COP_TK = 1x13
    3.5400    3.5900    4.4240    6.0952    5.9650    6.2254    4.7360    4.0750 ...
```

```
COP_gjennomsnitt=mean(COP_TK)
```

```
COP_gjennomsnitt = 4.2456
```

```
%Plott graf
plot(COP_TK)
xlabel("Måned")
ylabel("COP")
set(gca,'xtick',1:12,...
'xticklabel',{'Mar','Apr','Mai','Jun','Jul','Aug','Sep','Okt','Nov','Des','Jan','Feb','Mar'})
```





Version 7.3.3

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: tak_1m_maxeon

Variant: New simulation variant

No 3D scene defined, no shadings

System power: 180 kWp

Trondheim Katedralskole - Norway

Author

**PVsyst V7.3.3**

VCO, Simulation date:
20/04/23 11:37
with v7.3.3

Project: tak_1m_maxeon

Variant: New simulation variant

Project summary

Geographical Site Trondheim Katedralskole Norway	Situation Latitude 63.43 °N Longitude 10.39 °E Altitude 11 m Time zone UTC+1	Project settings Albedo 0.20
Meteo data Trondheim Katedralskole Meteonorm 8.1 (1991-2013) - Synthetic		

System summary

Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation Fixed planes 2 orientations Tilts/azimuths 10 / -90 ° 10 / 90 °	Near Shadings No Shadings	User's needs Monthly values
System information	Inverters	Battery pack
PV Array Nb. of modules 450 units Pnom total 180 kWp	Nb. of units 3 units Pnom total 165 kWac Grid power limit 100 kWac Grid lim. Pnom ratio 1.800	Storage strategy: Self-consumption Nb. of units 93 units Voltage 158 V Capacity 2759 Ah

Results summary

Produced Energy 119770 kWh/year	Specific production 665 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR 74.50 %
Used Energy 105600 kWh/year		Solar Fraction SF 52.71 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	5
Loss diagram	6
Predef. graphs	7
Single-line diagram	8



Project: tak_1m_maxeon

Variant: New simulation variant

PVsyst V7.3.3

VCO, Simulation date:
20/04/23 11:37
with v7.3.3

General parameters

Grid-Connected System

No 3D scene defined, no shadings

PV Field Orientation

Orientation

Fixed planes 2 orientations
Tilts/azimuths 10 / -90 °
10 / 90 °

Sheds configuration

No 3D scene defined

Models used

Transposition Perez
Diffuse Perez, Meteorom
Circumsolar separate

Horizon

Free Horizon

Near Shadings

No Shadings

User's needs

Monthly values

Storage

Kind Self-consumption

Grid power limitation

Active power 100 kWac
Pnom ratio 1.800

Charging strategy

When excess solar power is available

Discharging strategy

As soon as power is needed

Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	
12.3	11.4	10.8	8.48	7.56	5.70	4.65	7.19	8.98	8.03	9.43	11.0	106	MWh

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer Generic
Model SPR-MAX3-400
(Original PVsyst database)
Unit Nom. Power 400 Wp
Number of PV modules 450 units
Nominal (STC) 180 kWp
Modules 45 Strings x 10 In series
At operating cond. (50°C)
Pmpp 168 kWp
U mpp 591 V
I mpp 284 A

Inverter

Manufacturer Generic
Model SG50-CX
(Original PVsyst database)
Unit Nom. Power 55.0 kWac
Number of inverters 3 units
Total power 165 kWac
Operating voltage 200-850 V
Pnom ratio (DC:AC) 1.09
Power sharing within this inverter

Total PV power

Nominal (STC) 180 kWp
Total 450 modules
Module area 795 m²

Total inverter power

Total power 165 kWac
Number of inverters 3 units
Pnom ratio 1.09

Battery Storage

Battery

Manufacturer Generic
Model HeSU 4k4 home ESS 86Ah

Battery pack

Nb. of units 3 in series
x 31 in parallel
Discharging min. SOC 20.0 %
Stored energy 354.2 kWh

Battery Pack Characteristics

Voltage 158 V
Nominal Capacity 2759 Ah (C10)
Temperature Fixed 20 °C

Battery input charger

Model Generic
Max. charg. power 270.0 kWdc
Max./Euro effic. 97.0/95.0 %

Battery to Grid inverter

Model Generic
Max. disch. power 415.0 kWac
Max./Euro effic. 97.0/95.0 %



Project: tak_1m_maxeon

Variant: New simulation variant

PVsyst V7.3.3

VC0, Simulation date:
20/04/23 11:37
with v7.3.3

Array losses

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance
Uc (const) 20.0 W/m²K
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses

Global array res. 34 mΩ
Loss Fraction 1.5 % at STC

Module Quality Loss

Loss Fraction -1.3 %

Module mismatch losses

Loss Fraction 2.0 % at MPP

Strings Mismatch loss

Loss Fraction 0.2 %

IAM loss factor

Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000



Project: tak_1m_maxeon

Variant: New simulation variant

PVsyst V7.3.3

VCO, Simulation date:
20/04/23 11:37
with v7.3.3

Main results

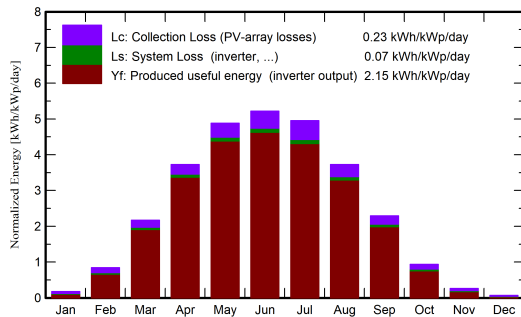
System Production

Produced Energy	119770 kWh/year	Specific production	665 kWh/kWp/year
Used Energy	105600 kWh/year	Perf. Ratio PR	74.50 %
		Solar Fraction SF	52.71 %

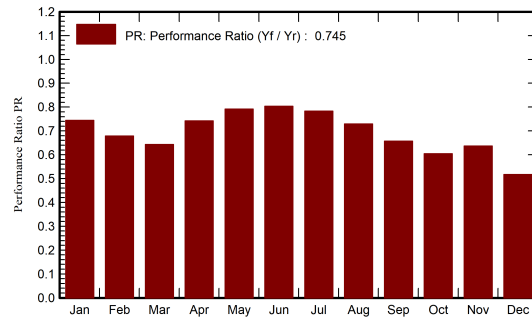
Battery aging (State of Wear)

Cycles SOW	98.7 %
Static SOW	93.3 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_User kWh	E_Solar kWh	E_Grid kWh	EFrGrid kWh
January	5.7	3.93	-1.12	5.4	4.3	719	12338	723	0	11615
February	22.7	11.64	-0.93	23.6	20.1	3566	11438	2883	0	8555
March	66.7	27.78	0.94	67.4	61.8	11042	10756	7649	152	3107
April	111.5	45.70	5.23	111.8	105.8	18703	8480	8276	6650	204
May	151.0	69.99	9.53	151.4	145.4	25075	7563	7500	14079	63
June	159.5	81.79	12.29	156.6	150.3	25649	5703	5703	16953	0
July	154.8	76.74	15.66	153.7	147.5	24722	4650	4650	17002	0
August	116.0	61.45	14.88	115.5	110.3	18919	7187	7121	8041	66
September	67.6	33.50	10.95	68.7	64.4	11147	8984	6895	1228	2089
October	29.5	17.32	6.27	29.0	25.9	4502	8033	3160	0	4873
November	8.0	5.48	2.15	7.9	6.5	1089	9431	906	0	8525
December	2.4	1.86	-0.30	2.1	1.7	266	11037	199	0	10838
Year	895.5	437.18	6.34	893.1	843.8	145399	105600	55665	64105	49935

Legends

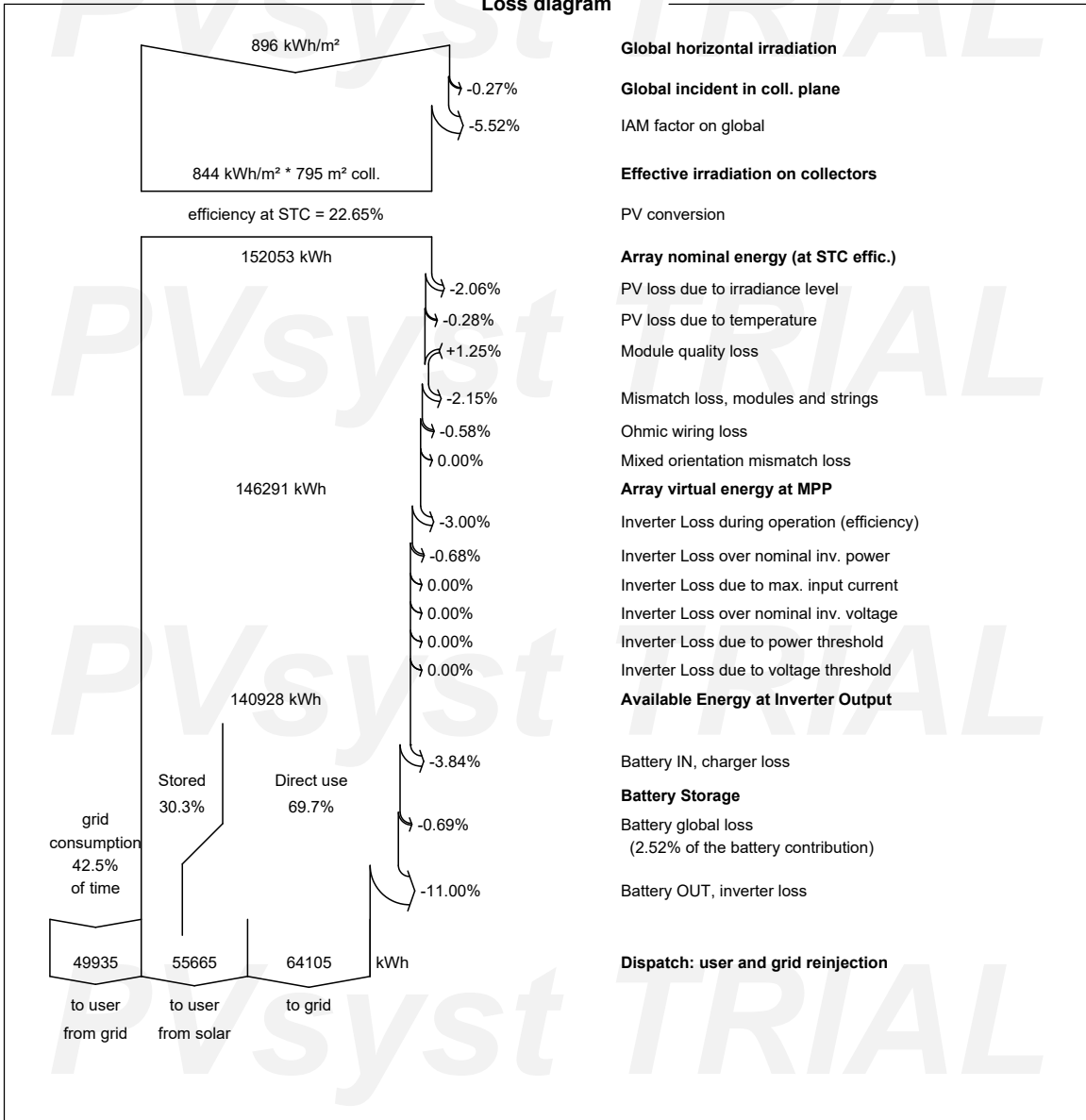
GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_User	Energy supplied to the user
T_Amb	Ambient Temperature	E_Solar	Energy from the sun
GlobInc	Global incident in coll. plane	E_Grid	Energy injected into grid
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings	EFrGrid	Energy from the grid



PVsyst V7.3.3

VC0, Simulation date:
20/04/23 11:37
with v7.3.3

Loss diagram





Project: tak_1m_maxeon

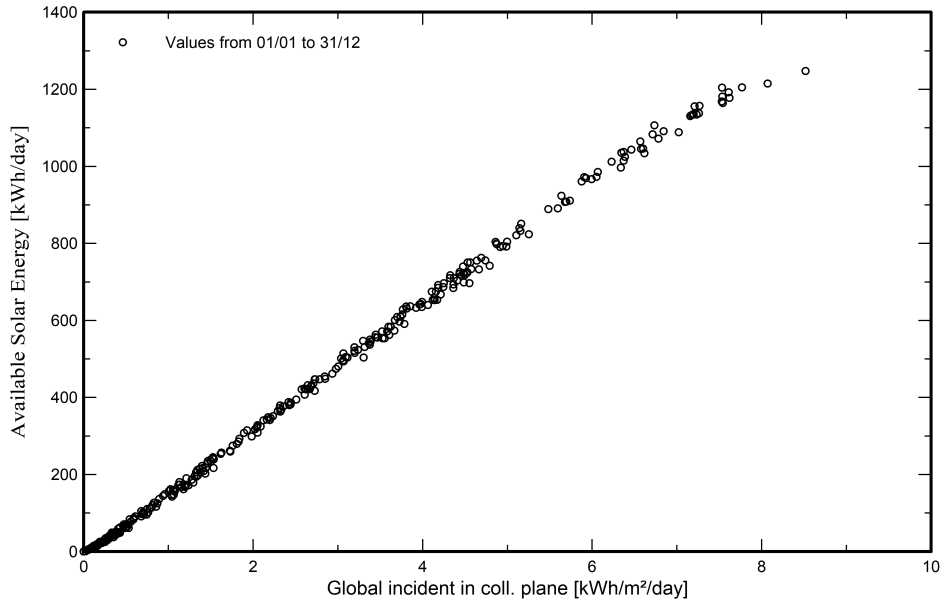
Variant: New simulation variant

PVsyst V7.3.3

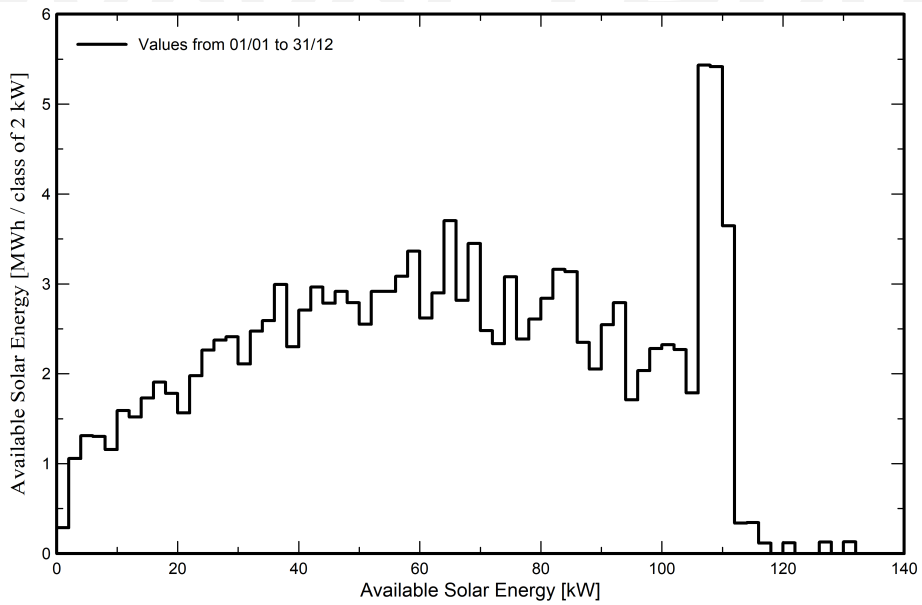
VC0, Simulation date:
20/04/23 11:37
with v7.3.3

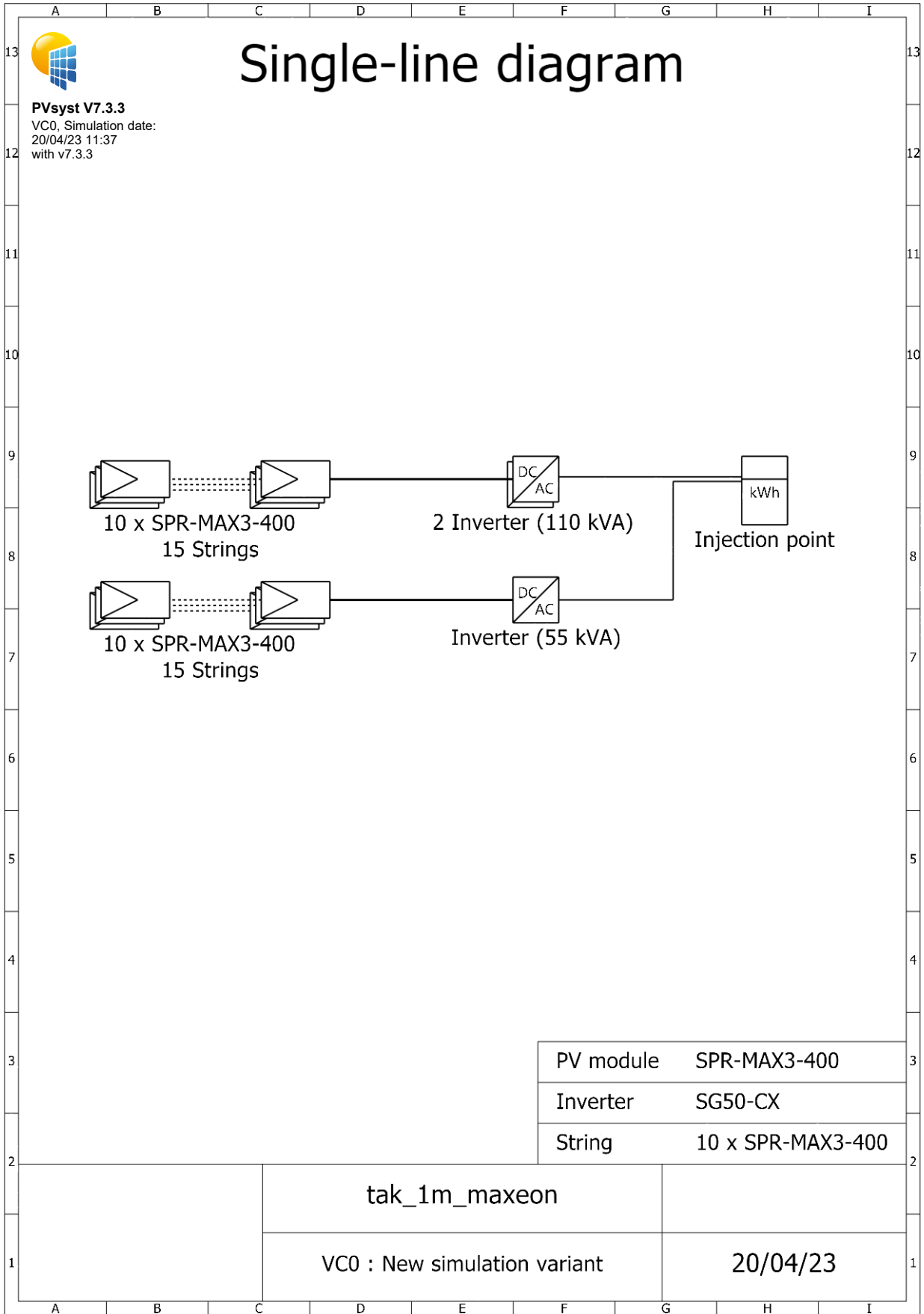
Predef. graphs

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution





I Opphavsrettsnotis Standard Norge

Tabell 4 'Krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming' fra NS 3701:2012 er gjengitt av Marita Rendedal, Nadia Supinska og Jannike S. Økland til bruk i oppgaven Energiforsyning med fokus på ZEB i Trondheim Katedralskole med tillatelse fra Standard Online AS i (april 2023).

Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se www.standard.no.

Data fra Tabell 5 'Verdier for å bestemme kravet til netto spesifikt energibehov til oppvarming' fra NS 3701:2012 er gjengitt av Marita Rendedal, Nadia Supinska og Jannike S. Økland til bruk i oppgaven Energiforsyning med fokus på ZEB i Trondheim Katedralskole med tillatelse fra Standard Online AS i (april 2023).

Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se www.standard.no.

Data fra Tabell 6 'Krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling' fra NS 3701:2012 er gjengitt av Marita Rendedal, Nadia Supinska og Jannike S. Økland til bruk i oppgaven Energiforsyning med fokus på ZEB i Trondheim Katedralskole med tillatelse fra Standard Online AS i (april 2023).

Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se www.standard.no.

Data fra Tabell 7 'Kjølebehovskoeffisient for å bestemme kravet til netto spesifikt energibehov til kjøling' fra NS 3701:2012 er gjengitt av Marita Rendedal, Nadia Supinska og Jannike S. Økland til bruk i oppgaven Energiforsyning med fokus på ZEB i Trondheim Katedralskole med tillatelse fra Standard Online AS i (april 2023).

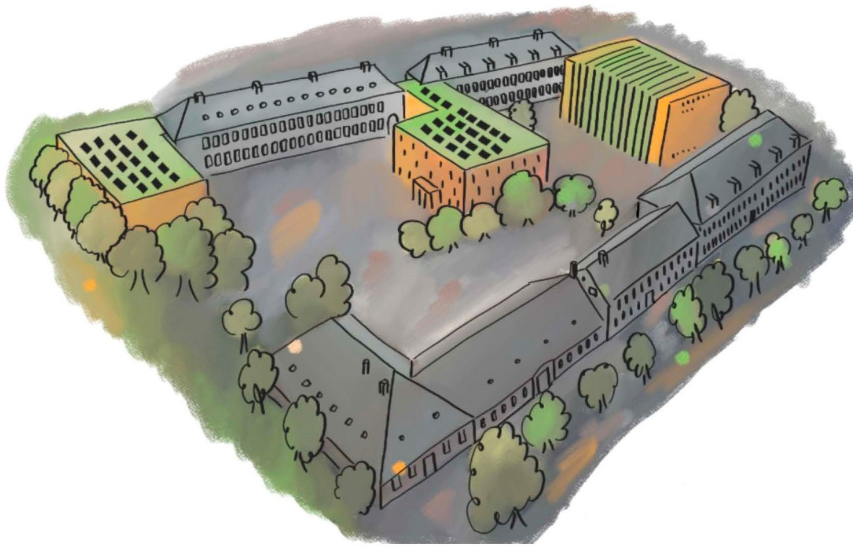
Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se www.standard.no.

Tabell 9 'Minstekrav til bygningsdeler, komponenter, systemer og lekkasjetall' fra NS 3701:2012 er gjengitt av Marita Rendedal, Nadia Supinska og Jannike S. Økland til bruk i Energiforsyning med fokus på ZEB i Trondheim Katedralskole med tillatelse fra Standard Online AS i (april 2023).

Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se www.standard.no.

FENT2900 - Bacheloroppgave, Fornybar Energi

Forprosjekt



Marita Rendedal
Nadia Supinska
Jannike S. Økland

Ingeniør Fornybar Energi
Vår 2023



Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosesseteknikk

Forprosjekt til bacheloroppgave

Oppgavens arbeidstittel: Norsk: Rehabilitering og bygging mot ZEB-bygg (nullutslippsbygg) Engelsk: Rehabilitation and construction towards ZEB buildings (zero emission buildings)	Studieretning Ingeniør, Fornybar Energi
Prosjektnummer BIFOREN23-03	Innleveringsdato 22.05.2023
Gruppedeltakere Marita Rendedal Nadia Supinska Jannike S. Økland	Oppdragsgiver Rambøll Trondheim
Intern veileder Jacob Lamb jacob.j.lamb@ntnu.no	Ekstern veileder Laurina Felius l.c.felius@gmail.com

Forord

Dette er et forprosjekt i faget FENT2900 og danner grunnlaget for bacheloroppgave. Oppgaven skrives av en gruppe bestående av tre tredjeårstudenter fra bachelorstudiet Fornybar Energi med retningen effektiv energibruk.

Forprosjektet ble gjennomført i januar 2023 med et formål om å planlegge gjennomføringen av bacheloroppgaven. Gjennom forprosjektet skal det utarbeides mål og rammer, plan for gjennomføring, risikovurdering, tidsplan og samarbeidsavtale til den endelige oppgaven.

Oppdragsgiveren er Rambøll i Trondheim med Laurina Felius som ekstern veileder. Oppgaven og problemstillingen er utarbeidet av bedriften og valgt av gruppen. Takk til oppdragsgiveren som gjør dette prosjektet mulig og bidrar med data, kunnskap og veiledning. Gruppen vil også takke intern veileder Jacob J. Lamb ved institutt for energi- og prosesssteknikk for god hjelp og støtte.

Innhold

Forprosjekt til bacheloroppgave	i
Forord	ii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Avgrensninger og forutsetninger	1
1.3 Prosjektdeltakere	1
1.4 Bidragsytere	2
2 Mål og rammer	3
2.1 Orientering	3
2.2 Problemdefinering	3
2.3 Prosjekt mål	4
2.4 Rammer	4
3 Gjennomføring	5
3.1 Hovedaktiviteter	5
3.2 Milepæler	7
3.3 Flytdiagram	8
4 Oppfølging og kvalitetsikring	9
5 Risikovurdering	10
A Samarbeidsavtale	I
B Gantt-diagram	IV

1 Innledning

Denne oppgaven er et forprosjekt og er en del av emnet FENT2900 Bacheloroppgave, Fornybar Energi. Forprosjektet danner grunnlag for videre arbeid med bacheloroppgaven i løpet av vårsemester 2023. Oppgaven handler om rehabilitering av Trondheim Katedralskole med fokus på å oppfylle ZEB-O eller ZEB-O ÷ EQ krav. Gruppens fokus er rettet mot solceller og hvordan disse kan prosjekteres for best mulig ytelse. Det skal også vurderes om det er behov for å kombinere solceller med energilagring. Rambøll Trondheim er oppdragsgiver og samarbeidspartner i dette prosjektet. Forprosjektet er et verktøy for prosjektets fremdrift og oppbygging.

Bacheloroppgaven er delt inn i fire faser: fase 0, fase 1, fase 2 og fase 3. Hver fase inneholder klare mål og disse er framstilt i Gantt-diagrammet. Målene er delt inn i effekt- og resultatmål.

1.1 Bakgrunn

Trøndelag Fylkeskommune er byggeherren som har uttrykt behov for rehabilitering og ombygging av eksisterende bygg og nybygg ved Trondheim Katedralskole. De nye bygningene skal oppnå ZEB-O eller ZEB-O ÷ EQ krav. ZEB-O vil si at fornybar energiproduksjon innad i bygningen kompenserer for klimagassutslippet fra drift av bygningen, mens ZEB-O ÷ EQ er det samme bare uten å ta hensyn til den energien som går til bruk av utstyr. Det vil i løpet av prosjektet bli avklart hvilket av de kravene det satses på.

Det er identifisert behov for solceller og fjernvarme til energiforsyning av bygget. Ulike alternativer for prosjektering av solceller må analyseres. Ettersom bygget er en skole er det en utfordring knyttet til at bygget ikke er brukt i perioder med høyest energiproduksjon og det må avklares hva som skal gjøres med overskuddsenergien.

1.2 Avgrensninger og forutsetninger

For å avgrense prosjektomfanget skal det fokuseres hovedsakelig på solceller i en eventuell kombinasjon med energilagring. Ettersom bygget skal oppfylle ZEB-krav er det strenge krav til materialbruk og transport av materialer, og ikke minst må det tas hensyn til senere gjenvinning av materialer. Tungmetaller bør unngås og solcellepaneller og bæresystem må velges nøye. Eksisterende deler av bygget er verneverdig, noe som begrenser arbeidsomfanget knyttet til solceller til kun nybygg.

1.3 Prosjektdeltakere

Marita Rendedal (hun/henne)

Tlf: 415 03 218

Epost: marirend@stud.ntnu.no

Tredjeårsstudent på Fornybar energi med fordypning i effektiv energibruk ved NTNU.

Kompetanse innenfor fjernvarme og elektriske energisystemer, energilagring, livsløps-

vurdering av energisystem (LCA), elektroteknikk, fluidmekanikk, termodynamikk, varme- og massetransport, kjernekraft og bærekraftig produktdesign.

Nadia Supinska (hun/henne)

Tlf: 486 19 595

Epost: nadiasu@stud.ntnu.no

Tredjeårsstudent på Fornybar Energi med fordypning i effektiv energibruk ved NTNU.

Dette innebærer kompetanse innenfor energibruk i bygninger, prosjektledelse, energisystem analyse, energilagring, fjernvarme og elektriske energisystemer, solenergi, termodynamikk, fluidmekanikk, bioenergi og elektroteknikk.

Jannike Sapio Økland (hun/henne)

Tlf: 928 81 568

Epost: jannikok@stud.ntnu.no

Tredjeårsstudent på Fornybar Energi med fordypning i effektiv energibruk ved NTNU.

Dette innebærer kompetanse innenfor prosjektledelse, energilagring, fjernvarme og elektriske energisystemer, livsløpsvurdering av energisystem (LCA), solenergi, termodynamikk, fluidmekanikk, varme- og massetransport, elektroteknikk og energisystem analyse.

1.4 Bidragsyttere

Laurina Felius (Rambøll Trondheim)

Jacob Lamb (NTNU)

2 Mål og rammer

Denne delen av forprosjektet forklarer grunnlaget for gruppens valg av oppgave. Problemstillingen blir presentert og det settes mål og rammer for oppgaven.

2.1 Orientering

Denne oppgaven er valgt basert på at alle gruppemedlemmene hadde en felles interesse for en bacheloroppgave innenfor temaet energieffektive bygg. Problemstillingen var listet opp blant forslag fra studieprogramleder og vekket interesse hos gruppemedlemmene. Det ble dermed satt som første ønske på oppgavesøknaden. Oppgaven ble listet opp av Rambøll i Trondheim og gruppen så på det som en fordel å samarbeide med en bedrift.

2.2 Problemdefinering

Norsk:

Målet med denne bacheloroppgaven er finne ulike alternativer for solcelleløsninger på taket til nybyggene til Trondheim Katedralskole, samt finne ut om lagringsmuligheter for overskuddsproduksjon. Prosjektet tar utgangspunkt i ZEB-krav og har som mål å oppnå disse. Arbeidet med prosjektet kommer til å gå ut på å finne det beste alternativet for prosjektering av solcelleanlegget uten at det går utover vernet bygg, og finne ut av hva man kan gjøre med den produserte overskuddsenergien i perioder der bygget ikke er i bruk (sommeren).

English:

The goal of this bachelor thesis is to find different alternatives for solar cell solutions on the roof of Trondheim Katedralskole and find storage options for the excess energy. The project is based on ZEB-requirements and its goal is to achieve those. The work with this projects is related to finding the best solution for engineering of the solar cell system without affecting the protected area, and to figure out what can be done with the excess energy in the time periodes the building's not in use (summer).

2.2.1 Spesifikasjoner

Oppgaven tar utgangspunkt i Trondheim Katedralskole, eid og driftet av Trøndelag fylkeskommune. Aktøren som er ansvarlig for byggeplassen er Betonmast. Bedriften som bidrar med rådgivningstjenester er Rambøll. Per dags dato er ikke byggingen påbegynt og prosjektet befinner seg i planleggingsfasen. Det antas oppstart av byggeprosessen i løpet av 2023, og forventet klargjøring blir i løpet av 2025 med forbehold om endringer. En utfordring i byggefasen er at skolen skal opprettholde normal drift. Arbeidet kommer til å gå ut på å rive ned det ene bygget og bygge ut nye bygg. Nybyggene kommer til å være tilkoblet solcelleanlegget, mens hele Trondheim Katedralskole forblir tilkoblet fjernvarmenettet.

2.3 Prosjektmål

Målene i bacheloroppgaven er skrevet av gruppen etter rådgivning med ekstern veileder.

2.3.1 Effektmål

Denne oppgaven vil utforske ZEB-krav og hvordan en bygning kan nærme seg disse. Gruppen kommer til å utforske en bedre utnyttelse av energiresursser og løsninger for overproduksjon og lære mer om ZEB-krav. Oppgaven vil øke kunnskapen rundt solcelleprosjektering og produksjon i kombinasjon med energilagring. Prosjektet tar for seg FNs bærekraftsmål nummer 7 - *ren energi for alle*, nummer 9 - *innovasjon og infrastruktur*, nummer 11 - *bærekraftige byer og samfunn* og nummer 13 - *stoppe klimaendringene*.

2.3.2 Resultatmål

Prosjektet skal resultere i en rapport som tar for seg ulike alternativer for solcelleprosjektering på nybyggene til Trondheim Katedralskole. I tillegg kommer oppgaven til å ta for seg ulike alternative løsninger for lagring av overskuddsenergi fra solceller. Målet er å nå ZEB-krav, samt som man bevarer vernet bygg. Prosjektet skal leveres innen 22. mai 2023.

2.4 Rammer

For å løse denne oppgaven trenger gruppen tilgang på programvarene *PVSyst* og *SIMIEN*. Det kreves ingen økonomiske midler, utstyr eller tilgang på laboratorium.

3 Gjennomføring

Utarbeidingen av gjennomføringen av oppgaven legger grunnlaget for hvordan gruppen skal jobbe videre med prosjektet, når underoppgavene skal gjennomføres og hva som er hovedprioriteringene. Gjennomføringen er beskrevet i et Gantt-diagram som er vedlagt som vedlegg B.

3.1 Hovedaktiviteter

Hovedaktivitetene i prosjektet er beskrevet som ulike faser.

3.1.1 Fase 0: Oppstart og forprosjekt

Fase 0 tar for seg noen formelle krav og møter som må til for å fastsette nødvendig informasjon før selve prosjektet begynner.

Samarbeidsavtale

Denne avtalen skrives i felleskap for å avtale felles mål og rammer for gruppearbeidet og ivareta alle gruppemedlemmene under prosjektet. Samarbeidsavtalen er lagt ved som vedlegg A.

Møte med veileder - innføring i prosjektet

Det gjennomføres et innførings møte med veileder for å få all nødvendig informasjon for å gjennomføre prosjektet og for å kartlegge forventningene fra begge parter.

Lage en tidsplan

Det lages en tidsplan i form av et Gantt-diagram som gir en oversikt over når de forskjellige aktivitetene skal gjennomføres og hvor lang tid de vil ta. Dette er for å få en oversikt over alt som må gjennomføres og til hvilke tidsfrister.

3.1.2 Fase 1: Prosjektinnføring og kartlegging

Fase 1 tar for seg innføringen i prosjektet, oppsett, og kartlegging og innhenting av data.

Disposisjon for sluttrapport

Dette gjennomføres av hele gruppen for å ha et utgangspunkt av rapporten å jobbe videre utifra og for å lettere kunne fordele oppgaver innad i gruppen.

Innhente nødvendig teknisk informasjon og litteratur

Dette fordeles mellom gruppemedlemmene og gjøres for å kunne ta informerte avgjørelser og vurderinger. Krav for nullutslippsbygg skal undersøkes gjennom Byggforskserien til *SINTEF* og annen nødvendig informasjon vil bli hentet fra pålitelige kilder anbefalt av veiledere. Det vil også vurderes å utvide nåværende kontakter til blant annet:

- Jonas Buan, HENT AS
- Shiplu Sarker, Førsteamanuensis ved NTNU
- Tom Utvik, Betonmast Trøndelag

- Arild Gustavsen, Professor ved NTNU

Denne aktiviteten vil være relevant gjennom hele prosjektet og være et viktig aspekt hele veien.

Kartlegge databehov

Databehovene kartlegges for å kunne starte med datainnsamling og for å kunne fordele hvilket gruppemedlem som skal samle inn hva.

Datainnsamling

Dette arbeidet skal fordeles delvis i gruppen. Data må samles inn for å kunne gjøre nødvendige vurderinger og kalkulasjoner for å besvare oppgaven som er gitt. Hovedkomponentene som skal undersøkes mer, som er funnet hittil er:

- Energibehovet til de nye byggene
- Total forventet produksjon fra solcelleanlegget
- Bidraget fra fjernvarme
- Areal på taket og fasaden til nybyggene
- Lagringskapasitet til ulike batterityper

Kartlegge energiforsyningsmuligheter og -behov

Dette gjennomføres for å undersøke hvilke kombinasjoner av solcelle og batteri som kan dekke bygningens energibehov. Det skal undersøkes ulike prosjekteringsalternativer, for å finne det som fungerer best i det gitte området. Nødvendig data rundt energibehovet til bygningen blir gitt av oppdragsgiver. Energiproduksjon fra solcelle og lagringskapasitet til batteri skal kalkuleres av gruppa.

3.1.3 Fase 2: Analyse og databehandling

Fase 2 tar for seg analyse av innhentet data. Gruppen skal sette seg inn i all innsamlet informasjon og sette det i et sammenheng. Til slutt skal det undersøkes om nødvendige krav er oppfylt.

Vurdere en kombinasjon av solceller med energilagring

Det vil både være overskudd og underskudd av energiproduksjon fra solcellene. Det er viktig å ta hensyn til at skolen er stengt på sommeren når det er mest produksjon, samt er den i full drift på vinteren når det er forventet underproduksjon. Av denne grunn skal gruppen vurdere behov for energilagring og undersøke ulike alternativer knyttet til dette.

Kalkulere hvilke type solceller som er mest miljøvennlige å produsere

Det er behov for den mest miljøvennlige løsningen for at bygningen skal gå mot å bli et ZEB bygg. Gruppen skal dermed undersøke CO_2 -avtrykket til de ulike solcelletypene og finne den beste løsningen for dette prosjektet. Det vil både vurderes materialbruk, men også opprinnelsesland og transport knyttet til frakting av anlegget. Det samme gjelder bæreelementene i solcelleanlegget. Det må også vurderes hvilke type solceller som

har minst tungmetaller for å kunne avgjøre hvilke solceller som er mest miljøvennlig å gjenvinne for å kunne oppnå et ZEB bygg.

Kalkulere hvilke type solceller som er mest effektive

Dette er for å best mulig kunne dekke energibehovet til bygningen og for å kunne vurdere hva som er den mest miljøvennlige og effektive løsningen i de gitte omstendighetene. Dette vil gjøres ved å ta hensyn til klimaet og været i Trondheim.

Finne det beste alternativet - vurdere mot ZEB-krav

For å finne den beste løsningen må alle aktivitetene over vurderes opp mot hverandre. Kombinasjonen som gjør at bygningen er et ZEB bygg og kan dekke dens energibehov vil være den beste løsningen for dette prosjektet.

Vurdere om kortvarig energilagring til å forskyve energibruk og få lavere effekttopper er fornuftig for dette prosjektet?

Dette skal undersøkes om det er fornuftig å benytte seg av energilagring for å jevne ut effekttopper i løpet av en dag. Det er et stort prosjekt og det vil muligens kreve mer avanserte systemer enn det gruppen er i stand til å bidra med. Tiltaket vil føre til økonomiske fordeler for bygget og ikke minst på nettet lokalt. Samtidig bidrar dette til forsyningsikkerhet i bygget. Viktigheten av dette tiltaket må derfor vurderes grundig.

3.1.4 Fase 3: Ferdigstilling

Fase 3 tar for seg den oppsummerende og konkluderende delen av hele prosjektet.

Diskusjon og konklusjon

Gruppen skal finne ut av den beste løsningen for solcelleprosjektering i en eventuell kombinasjon med energilagring. Det skal argumenteres godt for valg av solceller, bæreelementer, batterier, leverandører og andre eventuelle faktorer som er avgjørende for oppgaven. Det skal konkluderes med det beste resultatet og valget skal begrunnes godt.

Den avsluttende fasen

I den avsluttende fasen skal det skrives en sluttrapport, med innlevering av første utkast. Her vil det vurderes om alle delene av rapporten er utfyllende og all nødvendig informasjon er med. Det skal gjennomføres korrekturlesning kontinuerlig og det vil produseres en presentasjon av rapporten som skal presenteres for sensorene.

3.2 Milepæler

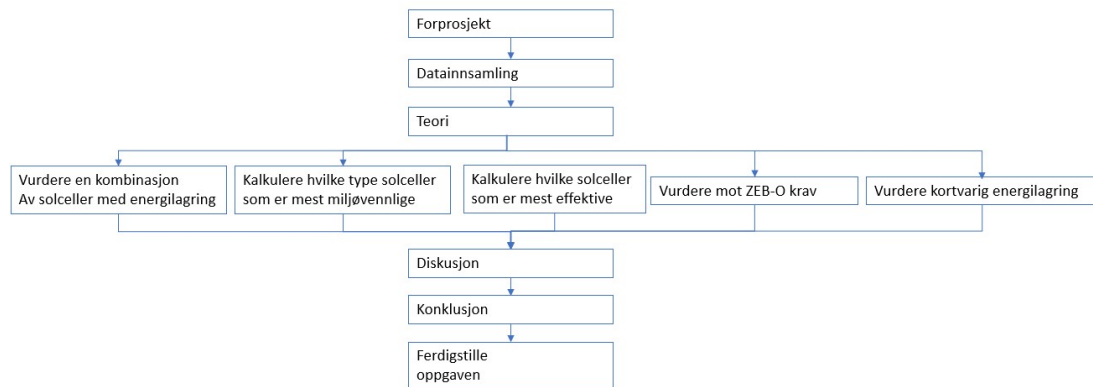
Prosjektet består av fire milepæler som må fullføres innen en bestemt dato som vist i tabell 3.1

Tabell 3.1: Denne tabellen viser en oversikt over alle milepæler i prosjektet

Milepæl	Dato
Innlevering av forprosjekt	27/1-23
Tidspunkt for første presentasjon	17/4-23
Innlevering av sluttrapport	22/5-23
Presentasjon	25/5-23

3.3 Flytdiagram

Figur 3.1 viser flytdiagrammet til prosjektet. Dette diagrammet viser altså en generell oppsummering av fasene og fremdriften i prosjektet.



Figur 3.1: Flytdiagram

4 Oppfølging og kvalitetsikring

Det skal sørges for at gruppen oppnår god kvalitet på oppgaven. Gruppen har et ønske om å oppnå høyest mulig karakter på bacheloroppgaven og derfor er det viktig at gruppen holder motet oppe. For å få best mulig kvalitet er det viktig med god oppfølging gjennom prosjektet. Oppfølging gjøres gjennom ulike dataplattformer, dokumentering og jevnlig møter.

Det skal være jevnlig møter innad i gruppen for å sørge for at arbeid blir gjort. Møtene er satt til å være fra klokken 8-16 hver ukedag, hvor noe av mandager og tirsdager kan gå til INGT2300 ingeniørfaglig systemtenkning frem til midten av mars. Det skal være møter med intern veileder annenhver uke og ekstern veileder kontaktes ved behov. Gruppen ønsker få dokumentert mest mulig arbeid slik at veilederne får innblikk i arbeidet. Det vil forhåpentligvis gjøre veiledningen lettere. Gruppen setter pris på all veiledning og ønsker et mest mulig effektivt samarbeid med veiledere.

Gruppen har en felles mappe hvor rombooking, ukeplan, kalender, oversikt over forsentkomming og Gantt-diagram er tilgjengelig. Mappen inneholder også et dokument med informasjon om oppgaven slik at gruppen sikrer å holde seg mest mulig innenfor rammene. Denne mappen blir brukt slik at medlemmene vet hva de skal gjøre til enhver tid og holder seg på tidsplanen. For å sikre kvalitet har gruppen også et dokument i mappen med regler på rapportskrivning slik at oppgaven blir mer ryddig. Det ønskes å være konsekvent med skrivingen gjennom hele prosjektet. Gruppen har også en annen mappe med ekstern veileder for å få tilgang til relevante dokumenter fra bedrift.

Risikovurdering og klarhet over hvordan potensielle utfordringer håndteres og unngås er viktig. Gruppen har tatt en risikovurdering og skrevet en samarbeidsavtale slik at man vet hva som forventes og hvordan å håndtere eventuelle utfordringer.

5 Risikovurdering

En risikovurdering er nyttig for å forhindre at potensielle utfordringer og uønskede hendelser skal oppstå. En slik vurdering er tatt slik at gruppen er mer klar over hendelser som kan inntreffe og vet hvordan å håndtere disse. Noen potensielle utfordringer som kan dukke opp under prosjektet er:

Data over energibehov

- 2 år med pandemi kan påvirke disse dataene
- Værforhold kan variere
- Er det tildelt eller funnet nok data?

Kilder

- Er kildene pålitelige?
- Finne forfatter av kildene
- Ikke bruke for mange kilder og huske på at man skal komme frem til ting selv
- Plagiat

Fagfolk

- Svar fra relevante fagfolk kan ta tid
- Blir riktige fagfolk kontaktet?

Relevanse

- Passe på at man holder seg innenfor oppgaverammene

Bygget

- Byggene som allerede er der er svært gamle og er vernet. Det skal bygges nye bygg hvor solceller kan plasseres. Man må passe på at solcelleanleggene ikke påvirker de vernede byggene
- Skolen blir ikke brukt om sommeren, hvordan skal overskuddsenergien håndteres?

Dataverktøy

- Bruk av verktøy med data som ikke er utdatert
- Passe på at lisensen ikke går ut
- Lagring av data

Utførelse av oppgave

- Sykdom innad i gruppa
- Om prosjektet blir påvirket av ytre faktorer som jobb, verv, idrett eller andre fag

- Veiledere viser liten grad av tilgjengelighet eller samarbeidsevne ovenfor gruppen
- Det oppstår konflikter innad i gruppen
- Tekniske problemer slik at gruppen ikke får levert i tide

Noen tiltak for å håndtere eller unngå disse potensielle utfordringene kan være:

- Dobbelsjekke data og gjerne sammenligne ulike kilder
- Være bevisst innad i diskusjonsdelen over hva som kan være påvirkninger innad i datagrunnlaget
- Passe på at kilder blir referert til underveis slik at plagiat blir unngått
- Kontakte fagfolk i god tid for å få informasjon i tide
- Huske å lagre prosjektet underveis slik at man ikke mister arbeidet som er gjort
- Passe på at gruppen ligger litt foran for å unngå å bli påvirket av for eksempel sykdom eller ytre påvirkninger
- Passe på at kommunikasjonen mellom medlemmene er bra slik at man unngår konflikter. Åpenhet dersom man trenger pauser, passe på at alle får med seg hva som skal gjøres og hva som forventes i gruppen
- Dele data innad i gruppen slik at de andre deltakerne ikke blir påvirket dersom en av deltakerne opplever tekniske problemer

A Samarbeidsavtale

FENT2900 - Samarbeidsavtale

Vår 2023

Denne avtalen gjelder for samarbeidet mellom følgende studenter:

1. Marita Rendedal
2. Nadia Supinska
3. Jannike Økland

1 Målet med samarbeidet

- Målet med samarbeidet er å skrive og levere en felles bacheloroppgave på studiet Fornybar Energi. Tittelen på oppgaven er "Rehabilitering og bygging mot ZEB-bygg (nullutslippsbygg)". Det skal legges et grunnlag for gjensidig faglig utvikling, og påses at trivsel og samhold opprettholdes.
- Målet er å oppnå best mulig karakter, samtidig som alle får samme utbyttet.
- Målet er å ha en rettferdig arbeidsfordeling innad i gruppen. Denne avtalen skal legge ramme for å nå dette målet.

2 Arbeidstider og møter

- Tidsrommet kl. 08-16 mandag og tirsdag, er satt av til å jobbe med INGT2300. Dette gjelder til og med uke 11. Etter uke 11 er det bachelorjobbing mandag til fredag kl. 8-16.
- Tidsrommet kl. 08-16 onsdag til fredag, er satt av til å jobbe med bacheloroppgaven. Det kan avtales en tidligere slutt dersom alle medlemmer er enig.
- Om ett av gruppemedlemmene ikke har mulighet til å møte en dag i avtalt tidsrom kan det avtales helgejobbing eller zoom-møte etter behov. Gruppen kan også bli enig om helgejobbing for å rekke eventuelle frister.
- Det vil være møte med intern veileder hver andre uke. Møtene med ekstern veileder vil avtales etter behov. Møtetidspunkt og sted vil avtales fortløpende med veilederne.
- Booking av rom gjøres ved begynnelsen av hvert møte. Det følges en egen ukeplan for rombooking.
- Hvert møte begynner med en felles innsjekk, oppdatering av hva som skal gjøres og rombooking. Møtene avsluttes med utsjekk og oppdatering av ukeplanen med nye oppgaver. Det settes av cirka 15 minutter til hver aktivitet.
- Dersom det ikke er tilgjengelig grupperom, avtales alternative møtested i fellesskap, slik at alle deltakere er klar over møtested til en hver tid.

3 Planlegging og loggføring

- Etter hvert møte skal ukeplanen (Bachelor-Excel) oppdateres med nye oppgaver. Dette gjøres i fellesskap ved utsjekk. Ukeplanen fungerer som møtereferat. Kalenderen oppdateres kontinuerlig med eventuelle aktiviteter som havner i tidsrommet satt av til bachelor jobbing.
- Hver fredag skal det gåes gjennom hva som har fungert og ikke. Eventuelle forandringer skal gjøres da.
- Ukeplanen skal følges opp hver uke og eventuelle endringer skal gjøres i samsvar med alle gruppe-medlemmer.
- Det er en forståelse for at det skal være en jevn fordeling av arbeidstimer, men det viktigste er at alle gjennomfører sine arbeidsoppgaver.
- Det oppfordres til å bruke en 50/10 eller 45/15 sturkuren under arbeidstiden for felles fokus strukturert jobbing som forhindrer utbrenthet tidlig på dagen.

4 Fravær

- Om en av deltakerne skal forlate Trondheim, må dette avtales med resten av gruppen. Dette er for å forsikre at ingen drar under kritiske deler av prosjektet, men dette inkluderer ikke uforutsigbare hendelser. Forutsigbar fravær legges inn i kalenderen så fort det lar seg gjøre.
- Sykdom eller andre uforutsette hendelser må meldes fra om så fort som mulig, og telles som gyldig fravær. Man kan likevel velge å jobbe hjemmefra.
- Mot innleveringsfristen bli bachelorskriving prioritert framfor jobb og verv, om det lar seg gjøre, dersom nødvendig.
- Om en kommer til møtet etter akademisk kvarter tre ganger må vedkommene spandere noe godt på de andre to i løpet av dagen.

5 Psykisk- og fysisk helse

- Det er en felles forståelse om at enkelte perioder kan være vanskeligere enn andre. Gruppen er derfor enige om at hvis man opplever en slik periode, skal resten av gruppen varsles i fortrolighet.
- Dersom motivasjonen er nede, kan gruppen planlegge noe sosialt (team building) i lag for å holde motet oppe.
- Arbeidet med oppgaven skal under ingen omstendigheter komme på bekostning av deltagerens evne til å glede seg over hverandres selskap. Nødvendige tiltak for å oppnå dette må derfor prioriteres.

6 Komplikasjoner

- Dersom det skulle oppstå komplikasjoner ved gruppearbeidet, må handling tas. Det er lov med fravær, i henhold til punkt 4 og punkt 5, men dersom det blir mer enn 5 situasjoner hvor fravær meldes sent eller ikke meldes, må dette tas opp på et møte.
 - Om situasjonen ikke bedres skal de andre deltakerne sende ut et skriftlig varsel.
 - Hvis det fortsatt ikke blir bedring, skal situasjonen tas opp med veileder, og dette kan føre til at deltakeren ikke oppnår felles karakter, eventuelt mister retten til karakter. Denne avgjørelsen tas i samråd med faglærer og veileder.

-
- Alle sier seg enige i å høre hverandres meninger, dersom det skulle oppstå noe ubehag eller komplikasjoner, må alle grupped medlemmene finne en løsning som alle er enige om. Parter må finne et kompromiss. Dette må tas opp med en gang, for at det skal være et effektivt samarbeid.
 - Øvrige problemer tas opp med gruppen.
 - Om en på gruppen skulle trenge å være borte fra prosjektet i over to uker, skal det være et møte i gruppen. På møtet skal situasjonen diskuteres og man bestemmer evt tilrettelegging. Hvis det er snakk om langtidsfravær, over to uker og som vil påvirke prosjektet i stor grad, skal veileder involveres, slik at man kan finne en felles løsning.
 - Dersom en deltaker ikke har mulighet til å fullføre prosjektet grunnet uforutsette hendelser, må det vurderes om deltakeren skal få individuell karakter på arbeidet som den har gjort. Det er en felles forståelse om at deltakeren skal få vurdering.

7 Varighet og reformulering

- Denne avtalen er gyldig fra og med underskrift, og frem til oppgaven skal presenteres 25. mai 2023. Eventuelle justeringer kan forekomme, så lenge ønsket om reformulering ikke oppstår etter en hendelse som beskrevet i punkt 6 og de må godkjennes av alle medlemmer.

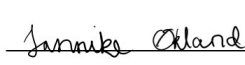
8 Kosetid

- Kaffepauser må skje hver dag, og gjerne flere ganger.
- Det oppfordres til spontan og sporadisk kos.
- Prosjektet avsluttes med felles middag.

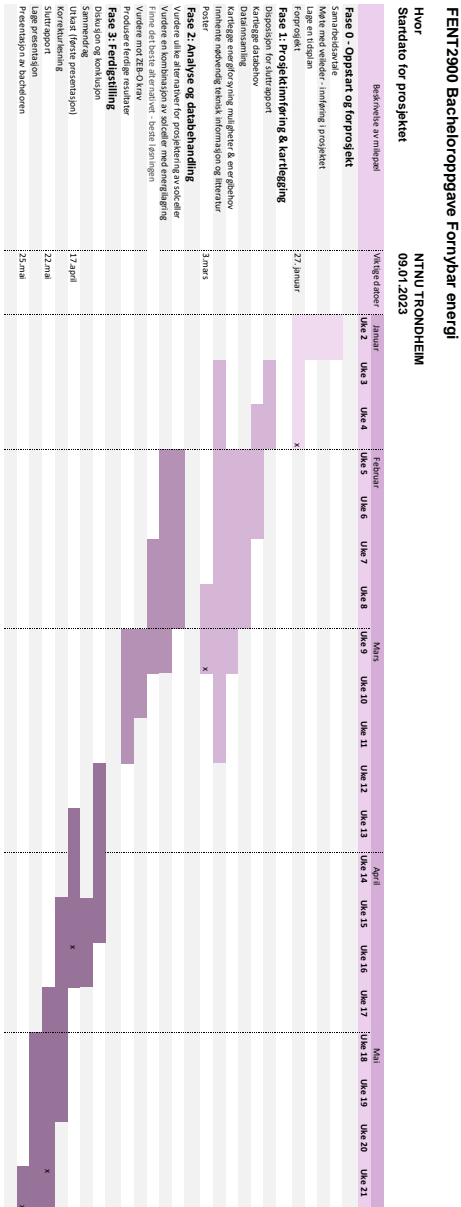
Trondheim 10. januar 2023


Nadia Supinska


Marita Rendedal


Jannike S. Økland

B Gantt-diagram





Energiforsyning med fokus på ZEB i Trondheim Katedralskole

Marita Rendedal, Jannike S. Økland, Nadia Supinska
 Institutt for Energi og prosesseteknikk

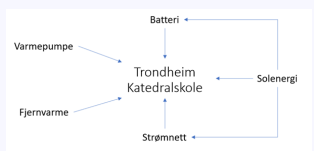


Introduksjon

Trøndelag fylkeskommune har som mål om å bli klimanøytrale innen 2030. Det innebærer å kutte ned 50-55 % av klimagassutslippene innen samme år. Bygg står for omtrent 40 % av klimagassutslippene. Renovering og bygging av klimanøytrale bygg er derfor et viktig tiltak for kutting av utslipp. Trondheim Katedralskole skal rehabiliteres og bygges for å oppnå kravene om å bli et nullutslippsbygg. For å oppnå dette skal gruppen undersøke ulike alternativer for solcelleimplementering på nybyggene i en kombinasjon med energilagring. Denne bacheloroppgaven skrives i samarbeid med Rambøll.

Energisystem

For at skolen skal bli et nullutslippsbygg er det nødvendig at store deler av energibehovet blir dekket av fornybar energi. Trondheim Katedralskole er allerede koblet til et fjernvarmenett fra Statkraft Varmer og denne skal dekke store deler av oppvarming til tappevann. Under prosjektet vil skolen også få luft-til-vann varmepumper som vil dekke stor grad av romoppvarming og ventilasjonsvarme.

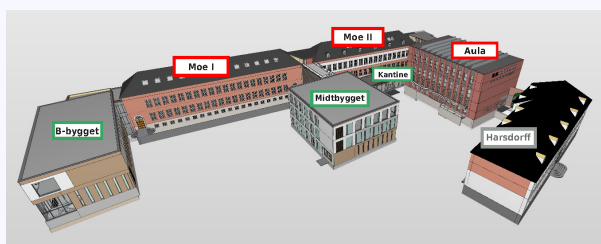


Solceller: Solceller konverterer energi fra solen til elektrisk energi ved hjelp av den fotovoltaiske effekt. Beregninger viser at det vil være behov for å produsere 105 600 kWh/år ved bruk av solceller for å kompensere for byggets CO₂-utslipp til byggets energiforbruk og møte ZEB-O krav. Solcellene skal prosjekteres på taket til to av byggene og eventuelt på fasaden til et av byggene.

Batterier: Batterier skal kobles sammen med solcellene slik at overskuddsenergien fra solcellleanlegget kan bli lagret. Batterianlegget skal dimensjoneres for minimum å kunne dekke 30 % av effektbehovet i driftstimer med høyeste effektlast og minimum levere 75 kW effekt, med en batterikapasitet på 350 kWh.

Om prosjektet - Trondheim Katedralskole

Trondheim Katedralskole ble grunnlagt i 1152. Det eldste av de eksisterende byggene - Harsdorff - stammer fra 1786. Moe I og Moe II ble bygd i henholdsvis 1925 og 1938. B-bygget kom i 1959 og det nyeste bygget er Aula som stod ferdigstilt i 1964. Det eksisterende B-bygget skal rives ned og erstattes av et nytt B-bygg. I tillegg skal det bygges et Midtbygget og en kantine. Oversikten over hele skolen er mulig å se i figuren under.



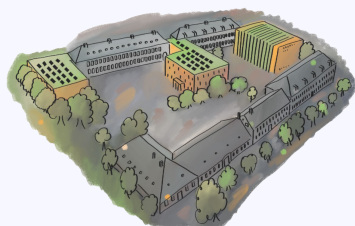
Moe I, Moe II og Aula skal renoveres innvendig, slik at byggene blir mer energigjerrige og kostnadseffektive. I tillegg vil innvendig renovasjon bedre innklimate og forhold i byggene. Det skal ikke forekomme noe utvendig oppussing eller renovasjon da disse byggene har delvis vernestatus. Harsdorff-bygget er ikke en del av prosjektet da bygget er fredet.

Bachelorgruppen skal i kontakt med næringslivet komme frem til noen prosjekteringsforslag. I tillegg skal gruppen finne ulike lagringsalternativer for overskuddsstrømmen fra solceller. Det blir vurdert både energiutveksling og energilagring. En utfordring med prosjektet er at skolen skal forbli åpen gjennom hele renoverings- og byggefasen. I tillegg er det strenge krav som begrenser deling av overskuddsenergien på tvers av tomtegrenser. Dette gjør at bachelorgruppen må undersøke ulike alternativer nøye. Til dette får gruppen rådgivning fra Rambøll i Trondheim



Mål med prosjektet

Denne bacheloroppgaven tar utgangspunkt i energiforsyning og klimanøytralisering av nybyggene til Trondheim Katedralskole. Målet med prosjektet er at nybyggene til skolen skal oppfylle Zero Emission Building (ZEB) krav. Disse kravene skal oppnås ved å undersøke ulike alternativer for solcelleimplementering på nybyggene i kombinasjon med energilagring. De eldre byggene er vernet og kan ikke ha solceller. Nybyggenes fornybare energiproduksjon skal veie opp for energibehovet ved drift, altså tilfredstille Zero Emission Building - Operation (ZEB-O) krav.



Batterianlegget skal dimensjoneres med tanke på ulike scenarier i sommer og vinter modus. Om sommeren vil det være størst produksjon av strøm fra solcellleanlegget, men skolen vil ikke være i bruk. En annen del av oppgaven går ut på å finne en løsning på hva som skal gjøres med denne overskuddsstrømmen.

ZEB

I dette prosjektet skal nybyggene oppfylle krav for nullutslippsbygg, altså ZEB-O krav. Det vil si at bygningens fornybare energiproduksjon kompenserer for klimagassutslipp fra driftfasen av bygningen.

For å oppnå ZEB-O kravene bør bygningens energibehov minimeres gjennom tiltak for energi-effektivisering i tillegg til å dekke bygningens energibehov ved produksjon av fornybar energi. I totalregnskap skal nullutslippsbygg ikke bidra til utslipp av klimagasser til atmosfæren.



Selv om ZEB-O fokuserer på driftfasen, er det i stor grad materialvalget som avgjør om det endelige resultatet er tilfredstillende. Gruppens oppgave her er å sørge for at valgte solceller har lavest mulig utslipp, i tillegg til at de skal produsere nok på årsbasis til å dekke det totale energibehovet til nybyggene.

