

Ane Mossing
2022-30

Optimalisering av energikonsept for bygninger - generering av inndata og følsomhet

Optimization of Energy Concept for Buildings -
Generation of Input Data and Sensitivity

Bacheloroppgave i ingeniørfag, bygg og miljø
Mai 2022

Ane Mossing
2022-30

Optimalisering av energikonsept for bygninger - generering av inndata og følsomhet

Optimization of Energy Concept for Buildings -
Generation of Input Data and Sensitivity

Bacheloroppgave i ingeniørfag, bygg og miljø
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk

<p>Tittel (norsk og engelsk):</p> <p>Optimalisering av energikonsept for bygninger - generering av inndata og følsomhet</p> <p>Optimization of Energy Concept for Buildings - Generation of Input Data and Sensitivity</p>	<p>Prosjektnr.:</p> <p>2022-30</p>
<p>Forfatter:</p> <p>Ane Mossing</p>	<p>Dato:</p> <p>20.05.2022</p> <p>Gradering:</p> <p>Åpen</p>
<p>Fordypning:</p> <p>Husbyggingsteknikk</p>	
<p>Veileder internt:</p> <p>Rolf André Bohne</p>	
<p>Oppdragsgiver:</p> <p>Multiconsult AS</p>	
<p>Oppdragsgivers kontaktperson:</p> <p>Elisabeth Wærnes</p>	
<p>Stikkord:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Energikonsept - Bygninger - Inndata - Følsomhet 	

Prosjektbeskrivelse:

Oppgaven handler i hovedsak om optimalisering av energikonsept for bygninger. Metoder for inndata og følsomhet skal gjennomgås og testes i ulike simuleringsprogram for å kunne optimalisere et simuleringsprogram under utvikling av Multiconsult.

Prosjektarbeidet deles i to deler. Første del vil bestå av innhenting av inndata til fire ulike energiforsynings-scenarier til et valgt kontorbygg, som testes i de ulike simuleringsprogrammene. De ulike scenarioene vil bestå av ulike måter å dekke energibehovet i kontorbygget på, for så kunne velge den beste løsningen basert på resultatene fra simuleringene. Det skal deretter gjøres sensitivitetsanalyser. Andre del av oppgaven vil være en fordypning i de resultater som kommer frem ved innhenting av inndata.

Under gjennomføring av prosjektoppgave knyttet til næringslivet er ønsket å lære mer om rådgivende aktørers rolle i næringslivet, knyttet opp mot miljøperspektivet i byggebransjen. Ved å kunne være med i et prosjekt fra oppstartsfasen, vil dette også være en god mulighet for å lære mer om bedrifters arbeid med et prosjekt.

Forord

Denne bacheloroppgaven er en avsluttende oppgave for det 3-årige ingeniørstudiet Bygg og miljø ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Rapporten utgjør de 20 avsluttende studiepoengene ved studiet.

Fra tidligere arbeid med en bacheloroppgave på ingeniørstudiet fornybar energi ved NTNU, ble interessen for energikonsept for bygninger tatt. Det var dermed et stort ønske om å kunne fortsette fordypningen i valg av energikonsept for bygg i arbeidet med denne bacheloroppgaven.

Oppgaven er utarbeidet i samarbeid med Multiconsult i Trondheim, ved Elisabeth Wærnes. Oppgaven er en del av et pågående prosjekt i Multiconsult for å optimalisere energikonsept for bygninger, ved å se på valg av inndata og følsomheten til resultatene. Jeg ønsker å takke Elisabeth Wærnes for godt samarbeid og god faglig veiledning. Jeg setter stor pris på tilliten jeg fikk ved gjennomføring av oppgaven.

Jeg ønsker å rette en takk til Carl Godager Kaas og Torje Evensen i Multiconsult for faglige innspill. En spesiell takk sendes til Solveig Heggvoll for god hjelp gjennom hele prosjektet.

Til slutt ønsker jeg å takke min interne veileder ved NTNU, professor Rolf André Bohne, for faglige og rapporttekniske innspill.

Trondheim, 20. mai 2022


Ane Mossing

Sammendrag

Denne rapporten ser på hvordan valg av inndata påvirker lønnsomhet og miljøpåvirkning, for å finne det optimale energikonseptet for et bygg. Det ble satt opp tre ulike energikonsept som kan benyttes i et kontorbygg, hvor to av de baserer seg på bruk av varmpumpe og elkjel, og den tredje på fjernvarme og kjølemaskin. Det ble besluttet at vannbåren varme skulle benyttes som distribusjonssystem, og dermed ble bergvarmepumpe og luft/vann-varmepumpe aktuelle løsninger. De tre konseptene er omtalt som BergVP, LuftVP og Fjernvarme.

Det ble benyttet to ulike simuleringsverktøy for å finne forbruksprofiler; SIMIEN og PROFet. For å finne det forventede årlige energiforbruket ble et program utviklet av Multiconsult benyttet. Programmet brukes også for å se om det er lønnsomt å installere solceller på tak og fasade. Det gjøres LCC og LCA for å finne lønnsomhet og klimagassutslipp, dette ble gjort i Excel og One Click LCA. Videre ble det gjort følsomhetsanalyse for å se hvordan nåverdi endrer seg med økende strømpris, og hvordan klimagassutslippene for fjernvarme blir påvirket av valgt forbruksmiks. Mange av de nødvendige inndataene er basert på erfaringstall fra tidligere prosjekt i Multiconsult.

Det er store forskjeller i beregnet energibehov for de tre energikonseptene, avhengig av benyttet lastprofil. De beregnede lastprofilene fra PROFet var generelt dobbelt så store sammenlignet med lastprofilene fra SIMIEN. Den elektriske effekten var derimot fire ganger så stor. Dette medførte at det årlige energiforbruket for de tre energikonseptene med lastprofilene fra PROFet også ble svært store. I tabell [0.2](#) presenteres de viktigste resultatene.

Tabell 0.1: Resultat for de tre energikonseptene.

	BergVP	LuftVP	Fjernvarme
Årlig energiforbruk_sim [kWh]	534 110	545 385	705 059
Årlig energiforbruk_prof [kWh]	1 886 796	1 908 285	2 237 920
Nåverdi_sim [NOK]	1 289 178	593 933	- 3 642 681
Nåverdi_prof [NOK]	10 359 412	5 843 338	- 5 070 912
Klimagassutslipp [kgCO₂e]	4 524 347	4 626 155	4 900 006

Strømpris ble variert opp til 2,4 *kr/kWh*. Dette ga nåverdi på 12 490 244 *kr* og 10 967 315 *kr* for BergVP_sim og LuftVP_sim. For Fjernvarme_sim ble verdien negativ, på 4 990 758 *kr*. For klimagassutslippene ble det kun sett på utslipp fra energikonseptene med lastprofil fra SIMIEN. Med valgt forbruksmiks for fjernvarme og elektrisitet var det små forskjeller. Følsomhetsanalysen for forbruksmiks viste derimot at valg av forbruksmiks påvirker resultatet i stor grad, og høyere forbruksmiks gir større utslipp.

Basert på resultatene er det tydelig at lønnsomhet og miljøpåvirkning fra de ulike energi-konseptet er sterkt knyttet til valg av inndata fra forbruksprofil, strømpris og forbruksmiks. De store forskjellene i forbruksprofil viser at PROFet per dags dato ikke er optimalt å benytte for å finne lastprofil for ett enkelt kontorbygg med passivhusstandard.

Abstract

This report is based on how different options of input data affects profitability and environmental impact, to find the best energy concept for a building. Three different energy concepts for an office building were chosen, where two of these uses a heat pump and an electric boiler, and the third option uses district heating and a cooling machine. The chosen distribution system was waterborn heat, which makes a ground source heat pump and air-to-water heatpump the best solution. The three energy concepts are called BergVP, LuftVP and Fjernvarme.

Two different simulation tools are used to find load profiles, to be able to compare the two. The first tool is SIMIEN, which is a well used tool in Norway. The second one is a relatively new tool made by SINTEF, named PROFet. A tool developed by Multiconsult is used to find the annual energy consumption, as well as to check if it is profitable to install photovoltaics on the roof and facade.

Most of the input data is based on experience figures from previous projects in Multiconsult. LCC and LCA is done to find profitability and greenhouse gas emissions. These calculations are done in Excel and One Click LCA. Further, a sensitivity analysis including spot price and consumption mix for district heating were done, to see how the present value and greenhouse gas emissions changed with higher spotprice and different consumption mix.

There were big differences in the energy needs for the three energy concepts, based on chosen load profile. The load profiles from PROFet were in general twice the size compared to load profiles from SIMIEN. The electrical power were almost four times bigger. This led to high annual energy consumption for the energy concepts that used load profiles from PROFet. The present value were only positive for two of the options, and only with load profiles from SIMIEN. Table 0.2 shows the most important results.

Tabell 0.2: Results for the three energy concepts.

	BergVP	LuftVP	Fjernvarme
Annual energy consumption_sim [kWh]	534 110	545 385	705 059
Annual energy consumption_prof [kWh]	1 886 796	1 908 285	2 237 920
Present value_sim [NOK]	1 289 178	593 933	- 3 642 681
Present value_prof [NOK]	10 358 412	5 843 338	- 5 070 912
Greenhouse gas emissions [kgCO₂e]	4 524 347	4 626 155	4 900 006

The energy concepts with load profiles from SIMIEN were used in the LCA. The results showed that there were only small differences in greenhouse gas emissions with the selected consumption mix for electricity and district heating. The sensitivity analysis pointed out that the selected consumption mix highly affects the results, which means that a higher consumption mix entails higher emissions.

Based on the results, it was concluded that the profitability and environmental impact from the different energy concepts are strongly linked to the choice of input data for load profiles, spot price and consumption mix. The differences in load profiles shows that PROFet is not the best option to use to find load profiles for an office with passive house standard.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Figurliste	viii
Tabelliste	ix
Begrepsliste	xi
1 Innledning	1
1.1 Formål og problemstilling	2
2 Teori	3
2.1 Lovverket	3
2.2 Sertifisering	3
2.2.1 BREEAM-NOR	4
2.3 Energibehov	5
2.4 Energisystem	5
2.4.1 Solceller	5
2.4.2 Vannbåren varme	6
2.4.3 Varmepumpe	7
2.4.4 Fjernvarme	8
2.4.5 Elektrokjel	9
2.4.6 Kjølemaskin	9
2.5 LCC	9
2.6 Kostnader	10
2.6.1 Energikostnader	10
2.6.2 Investerings- og driftskostnader	12
2.6.3 Kalkulasjonsrente	12
2.7 LCA	13
3 Metode	15
3.1 Forskningsdesign	15
3.2 Litteratursøk	15
3.3 Simulerings- og beregningsverktøy	16
3.3.1 SIMIEN	16
3.3.2 PROFet	17
3.3.3 PyCESO	18
3.3.4 One Click LCA	20
3.4 Dataanalyse	20
3.5 Begrensning	21
3.6 Kvalitetssikring	21

4 Case	22
4.1 Solceller	22
4.2 BergVP	24
4.3 LuftVP	25
4.4 Fjernvarme	26
5 Simuleringer og beregninger	27
5.1 SIMIEN	27
5.2 PROFet	28
5.3 PyCESO	29
5.3.1 Sensitivitet av lønnsomhet for solceller	30
5.4 Følsomhetsanalyse av inndata fra SIMIEN og PROFet	31
5.5 LCC	32
5.6 LCA	34
5.7 Følsomhetsanalyse	35
6 Resultat	36
6.1 Resultat fra LCC	36
6.2 Resultat fra LCA	40
6.3 Resultat fra følsomhetsanalyse	41
6.3.1 Endring i spotpris	41
6.3.2 Endring av forbruksmiks for fjernvarme	42
7 Diskusjon	43
7.1 Simulering av lastprofiler	43
7.2 BergVP med lastprofil fra SIMIEN	44
7.3 BergVP med lastprofil fra PROFet	45
7.4 LuftVP med lastprofil fra SIMIEN	45
7.5 LuftVP med lastprofil fra PROFet	45
7.6 Fjernvarme med lastprofil fra SIMIEN	45
7.7 Fjernvarme med lastprofil fra PROFet	46
7.8 Faktorer som påvirker resultatene	47
8 Feilkilder	48
9 Videre arbeid	49
10 Konklusjon	50
Referanser	51
A Vedlegg	I
B Vedlegg	I

Figurer

2.1	Oppbygging av silisumsolcelle. [1]	6
2.2	Utklipp vannbåren varme. [2]	7
2.3	Oppbygging av varmepumpe. [3]	7
2.4	Prinsippskisse av fjernvarmeanlegg. [4]	8
2.5	Analyseperiode for beregning av LCC-kalkyle. [5]	10
2.6	Historiske spotpriser og utvikling i gjennomsnittlig spotpris Norge. [6]	11
2.7	Et produkts livsløp i henhold til LCA. [7]	13
3.1	Utklipp fra SIMIEN.	17
3.2	Utklipp fra PROFet som viser bygningskategoriene.	18
3.3	Utklipp fra PyPSA som viser oppsett av økonomiske inndata.	19
3.4	Utklipp fra One Click LCA som viser oppsett av bygget.	20
5.1	Utklipp fra Excel med lastprofil fra SIMIEN.	28
5.2	Elektrisk last fra Profet.	29
5.3	Oppsett for grunnscenariot og BergVP i LCC-beregning.	32
5.4	Oppsett for grunnscenariot og BergVP i LCC-beregningen.	33
5.5	Oppsett av scenarioene i One Click LCA.	34
6.1	Nåverdi med lastprofil fra SIMIEN.	36
6.2	Nåverdi med lastprofil fra PROFet.	37
6.3	Nåverdi for BergVP_sim.	37
6.4	Nåverdi for BergVP_prof.	38
6.5	Nåverdi for LuftVP_sim.	38
6.6	Nåverdi for LuftVP_prof.	38
6.7	Nåverdi for Fjernvarme_sim.	39
6.8	Nåverdi for Fjernvarme_prof.	39
6.9	Klimagassutslipp for de valgte energikonseptene.	40
6.10	Klimagassutslipp fra hele livssyklusen.	40
6.11	Følsomhetsanalyse med nåverdi og strømpris.	41
6.12	Følsomhetsanalyse med forbruksmiks på 45 gCO_2/kWh .	42
6.13	Følsomhetsanalyse med forbruksmiks på 211 gCO_2/kWh .	42

Tabeller

0.1	Resultat for de tre energikonseptene.	ii
0.2	Results for the three energy concepts.	iv
2.1	Minimumskrav til energieffektivitet i TEK17. [8]	3
4.1	Kostnader for solcellesystem.	23
4.2	Beregnet kapasitet for solceller.	23
4.3	Kostnader for BergVP.	24
4.4	Kostnader for LuftVP.	25
4.5	Kostnader for Fjernvarme.	26
5.1	Oversikt over beregnet maksimal effekt.	30
5.2	Genererte lastprofiler fra SIMIEN og PROFet.	31
5.3	Resultat fra følsomhetsanalyse for lastprofiler.	31
6.1	Årlig energiforbruk.	36
7.1	Resultat for de tre energikonseptene.	43

Begrepsliste

a:	<i>Annuitetsfaktoren</i>
COP:	<i>Coefficient Of Performance</i>
Diskontere:	<i>Omregne en fremtidig verdi</i>
d_t :	<i>Diskonteringsfaktoren</i>
EU:	<i>European Union</i>
EL:	<i>Elektrisitet</i>
Iterasjon:	<i>Utføre noe flere ganger</i>
Kontantstrøm:	<i>Differansen mellom innbetalinger og utbetalinger</i>
K_t :	<i>Årlige kostnader</i>
LCA:	<i>Livssyklusanalyse</i>
LCC:	<i>Livssyklus kostnader</i>
LNG:	<i>Flytende naturgass</i>
LPG:	<i>Flytende naturgass</i>
NVE:	<i>Norges vassdrags- og energidirektorat</i>
NV_T :	<i>Summen av nåverdier av kostnader i analyseperioden [kr]</i>
NV_0 :	<i>Internrentemetoden [%]</i>
Passivhus:	<i>Standardklasse for bygg med lavt energibruk</i>
PV:	<i>Photovoltaic</i>
PVsystem:	<i>Simuleringsprogram for solenergiproduksjon</i>
Profet:	<i>Simuleringsprogram for forbruksprofiler i bygg</i>
PyPSA:	<i>Simuleringsprogram for kraftsystem</i>
PyCESO:	<i>Simuleringsprogram for forbruksprofiler i bygg</i>

r:	<i>Kalkulasjonsrenten</i>
SIMIEN:	<i>Simuleringsprogram for energibruk i bygg</i>
Spotpris:	<i>Markedskraftpris</i>
SSB:	<i>Statistisk sentralbyrå</i>
Strømpris:	<i>Markedskraftpris inkludert nettleie/avgifter</i>
T:	<i>Analyseperiode</i>
TEK:	<i>Byggeteknisk forskrift</i>
t_0 :	<i>Basisår for kalkylen</i>
VP:	<i>Varmepumpe</i>

1 Innledning

Det største verdensproblemet i dag er klimaendringer, og problemene som disse endringene medfører. Både i Norge og i verden er klima et svært betent politisk tema, som skaper splid både mellom verdenslandene og innbyggere. Hvilke tiltak skal gjøres for å bremse og stanse de menneskeskapte klimaendringene de neste tiårene?

En av de viktigste avtalene når det gjelder arbeid mot klimaendringer er Parisavtalen som ble vedtatt i 2015. Parisavtalen skal sørge for at alle verdens land skal kutte sine klimagassutslipp, og dermed forhindre at temperaturen på kloden ikke stiger mer enn to grader før århundret er over. Landene bør nå toppen av klimagassutslipp så fort som mulig, før mengden utslipp til atmosfæren skal synke jevnlig. Det skal være et bedre samarbeid for å tilpasse seg klimaendringer, ved å dele på kunnskap og erfaringer. Det må finnes gode metoder for å håndtere tap og skader som oppstår etter naturkatastrofer, blant annet systemer for tidlig varsling, risikoforsikring og migrasjon. Økonomisk vil landene bidra med 100 milliarder dollar i året, med økt bidrag etterhvert. Rike land skal hjelpe fattige land med å kutte sine klimagassutslipp og tilpasse seg klimaendringene. [9]

Kraftbruken i Norge er forventet å stige mot 2030, og det er derfor viktig å utnytte ressursene på best mulig måte for å holde kraftbehovet nede. Effektiv energibruk er derfor sentralt for å kunne nå klimamålene og unngå å bygge ut unødvendig kraftproduksjon. I en analyse fra NVE om potensiale for effektivisering i bygg, anslås det at energieffektivisering i bygg har et lønnsomt potensial opp mot 13 TWh, som tilsvarer 10 % av Norges strømforbruk. De mest lønnsomme tiltakene vil blant annet være energioppfølging, natt- og helgeoppfølging av temperatur og tiltak på ventilasjon. [10]

I Norge utgjør bygg 40 % av det totale energiforbruket. Det er derfor viktig å sikre effektiv energibruk, ved å benytte reguleringer, merkeordninger og informasjonsvirkemidler. I Norge har det vært stilt energikrav til nye bygg helt siden 1949, og energikravene har vært revidert og skjerpet flere ganger. Fra 2020 ble det forbudt å benytte seg av fossile energikilder til oppvarming, og det benyttes i dag elektrisitet, fjernvarme og varmepumpe. Det er gunstig å benytte varmeløsninger som ikke belaster kraftsystemet på vinterstid, og økt bruk av fjernvarme- og varmepumpeløsninger er derfor ønskelig. [11]

Et viktig virkemiddel for å kunne sikre mer effektiv energibruk i bygg, er å benytte seg av gode beregnings- og simuleringsverktøy i en forstudie av bygningens samlede energibehov. Riktig beregning av oppvarmings- og kjølebehov, samt elektrisk effekt, medfører at dimensjoneringen av energikonsept for bygget vil kunne bli mer nøyaktig. For å kunne simulere det teoretiske energibehovet er valg av simuleringsverktøy og inndata viktig.

1.1 Formål og problemstilling

Målet med oppgaven er å se på hvordan valg av inndata påvirker lønnsomhet og miljøpåvirkning for å finne det optimale energikonseptet for et bygg. Ønsket er å kunne gjennomføre mer nøyaktige simuleringer av energibehovet, som vil gi bedre vurdering av hva som er det beste energikonseptet. Fra Multiconsults side er det ønskelig å benytte resultatene til å videreutvikle metodikk for optimalisering av energikonsept, og hvordan inndata påvirker dette. Det er interessant å se på oppgaven i lys av den spente situasjonen som er i Europa i dag, med tanke på krig, endring i kraftmarkedet og økte strømpriser. For å konkretisere arbeidet er følgende problemstilling utarbeidet:

Hvordan kan inndata for forbruksprofil og følsomhet best genereres?

Problemstillingen er basert på et utvalg energikonsept som kan benyttes i et kontorbygg, og hvordan inndata og følsomhet påvirker valg av det beste energikonseptet. Det er tatt i bruk to simuleringsverktøy for å finne forbruksprofiler på timesnivå for et valgt testbygg, for å kunne sammenligne verdier og se på riktigheten av de gitte verdiene. Ved å benytte seg av forbruksprofiler på timesnivå, i stedet for årlig forbruksprofil, er det enklere å sammenligne forbruk og produksjon. Det er viktig at forbruk og produksjon følger hverandre, slik at det er høy produksjon de dagene hvor det også er høyt forbruk. Videre finnes annen inndata, slik som virkningsgrad og vedlikeholdskostnader, for de valgte energiteknologiene. Dette, sammen med forbruksprofilene, benyttes i simuleringsprogrammet til Multiconsult, for å finne det optimale energikonseptet for bygget. Det gjøres så LCC og LCA for alternativene, for å beregne kostnader og kartlegge miljøpåvirkningene fra produktene som benyttes. Til slutt gjøres det følsomhetsanalyser. To forskningsspørsmål er utviklet for å lettere kunne svare på problemstillingen:

- Er to simuleringer for forbruksprofiler nok?
- Vil følsomhetsanalysen endre hva som er det beste energikonseptet?

2 Teori

Dette kapittelet tar for seg relevant teori som skal støtte de eksperimentelle resultatene og valgene som er tatt i oppgaven. En av de seneste studiene som ser på lastprofiler for yrkesbygg er K.B. Lindberg, S.J. Bakker og I. Sartori i rapporten «Modelling electric and heat load profiles of non-residential buildings for use in long-term aggregated load forecasts». Denne rapporten er del av et større prosjekt om langsiktig lastprofiler på timesnivå som skal kunne brukes som inndata i planlegging av kraftsystemer på nasjonalt og lokalt nivå. Rapporten, samt tidligere arbeid som inngår i prosjektet, er lagt til grunn i simuleringsverktøyet PROFet, som skal benyttes for å finne lastprofiler i denne oppgaven. [12]

2.1 Lovverket

For å kunne oppføre byggverk lovlig i Norge, må et minimum av egenskaper oppfylles i henhold til forskriften om tekniske krav til byggverk (TEK). Forskriften har som formål å sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres med god visuell kvalitet og at det tas hensyn til universell utforming. Tiltaket skal også oppfylle tekniske krav til helse, sikkerhet, miljø og energi. Gjeldende forskrift ble innført i 2017, og kalles TEK 17. [13]

I henhold til § 14-2 i TEK 17 kan det totale netto energibehovet for kontorbygninger ikke overstige $115 [kWh/m^2]$ oppvarmet BRA per år, samtidig som kravene i § 14-3 oppfylles. Dette tilsvarer minimumskrav til energieffektivitet, og er vist i tabell 2.1. [8, 14]

Tabell 2.1: Minimumskrav til energieffektivitet i TEK17. [8]

U-verdi yttervegg [$W/(m^2K)$]	U-verdi tak [$W/(m^2K)$]	U-verdi gulv på grunn og mot det fri [$W/(m^2K)$]	U-verdi vindu og dør inkl. karm/ramme [$W/(m^2K)$]	Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell (luftutveksling per time)
$\leq 0,22$	$\leq 0,18$	$\leq 0,18$	$\leq 1,2$	$\leq 1,5$

De byggtekniske forskriftene har blitt revidert omtrent hvert femte år siden 2010, og arbeidet med den nye forskriften, TEK 20, er i gang. Denne forskriften vil sannsynligvis inneholde krav som gjør nye bygg til nesten nullenergibygg, med økt fokus på bærekraft. [15]

2.2 Sertifisering

Utover krav i lovverket er det mulig å benytte seg av sertifiseringer og merkeordninger for å øke bevisstheten rundt bærekraft og miljø i bygg. Miljøsertifiseringer, slik som Miljøfyrtårn, brukes av bedrifter som ønsker å vise sitt samfunnsansvar og drive mer lønnsomt med bærekraftig fokus. I følge undersøkelser foretrekker nordmenn å kjøpe produkter og tjenester fra miljøsertifiserte bedrifter. [16] Det er dermed en økonomisk gevinst ved å sertifisere utover krav i lovverket. Alle sertifiseringer og andre merkeordninger må benytte TEK 17 som minimumskrav.

2.2.1 BREEAM-NOR

BREEAM-NOR er den mest brukte miljøsertifisering av nybygg og større rehabiliteringsprosjekter i Norge i dag. Målet er å bygge bærekraftige bygg, med kvalitet utover byggeforskriftenes minstekrav og ta hensyn til verdier samfunnet er opptatt av. Gjeldende manual er BREEAM-NOR-v6.0 for nybygg som ble innført 28. februar 2022. Deres viktigste mål er å redusere negativ miljøpåvirkning fra nybygg og forbedre byggets positive påvirkning på samfunn og økonomi gjennom byggets levetid. [17]

Et bygg kan sertifiseres på fem ulike nivå, hvor bærekraftsnivået i bygget øker for hvert nivå. Hvert nivå er delt inn i ti kategorier som skal sikre at alle de viktigste aspektene ved bærekraft er tatt hensyn til. Det tildeles poeng i hver kategori basert på tiltakene prosjektet innehar, som til slutt avgjør hvilket sertifiseringsnivå prosjektet lander på. [17] En av kategoriene i manualen er Energi (Ene), som er inndelt i flere emner.

For emnet *Ene 01 Bygningens energiytelse* er formålet å «anerkjenne og oppfordre til bygg med minimalt energiforbruk i driftsfasen gjennom god utforming». Emnet består av syv kategorier med vurderingskriterier, hvor ett av 12 poeng kan tildeles energiforsyning med lavt klimagassutslipp, steg 5 til og med 8. En energispesialist skal utføre en forstudie av bygningens samlede energibehov, som i følge manualen minst skal omfatte [17]:

1. *energi produsert av de klimavennlige energiforsyningsløsninger per år*
2. *beregning av CO₂-reduksjon i 60-års periode for de klimavennlige energiforsyningsløsninger per år. For beregning av CO₂-reduksjon må Europeisk (EU28+NO) forbruksmiks legges til grunn for vurderingen*
3. *LCC-analyse iht. Metode M1 under Man 02 for mulige klimavennlige energiforsyninger med redegjørelse for inntjening*
4. *lokale forutsetninger og begrensninger, som reguleringsbestemmelser, inkludert arealbruk og støy som vil påvirke valg av energiforsyningsløsninger*
5. *mulighet til å eksportere varme/elektrisitet fra systemet*
6. *eventuelle tilgjengelige subsidier*
7. *eventuelle teknologier som er hensiktsmessige for utbyggingsområdet og bygningens energibehov*
8. *begrunnelse for å utelukke andre teknologier*
9. *Dersom det er relevant:*
 - *Bygningen er knyttet til et eksisterende kraftvarmesystem; ELLER*
 - *Bygningen er koblet til en eksisterende spillvarmekilde; ELLER*
 - *Bygningens eller utbyggingsområdets kraftvarmesystem er spesifisert med mulighet for å eksportere varme- eller energioverskuddet via et energidistribusjonssystem i nærområdet; ELLER*

- *En spillvarmekilde er spesifisert med mulighet for å eksportere varme- eller energioverskuddet via et energidistribusjonssystem i nærområdet.*

10. energilagring

Et bygg basert på energikrav i TEK 17 som forsynes med strøm fra nettet, benyttes som sammenligningsgrunnlag for å demonstrere reduksjonen av CO_2 -ekvivalenter. [17]

2.3 Energibehov

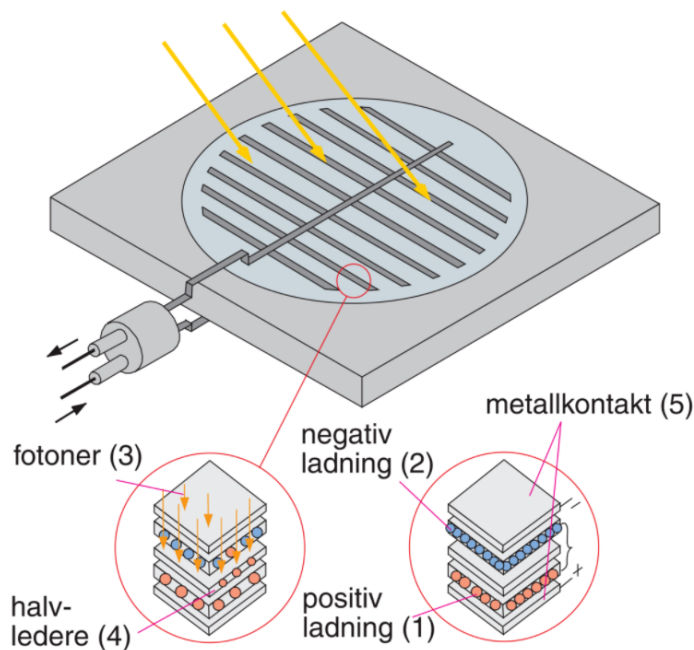
Energibruk i bygg deles inn i to kategorier; termisk og elektrisk energi. Termisk energi er i hovedsak oppvarming, kjøling og varmt tappevann. Dette kan inkludere romoppvarming og -kjøling, ventilasjonsvarme og -kjøling, samt varmt forbruksvann. Elektrisk energi er driftsteknisk utstyr, belysning og brukerteknisk utstyr. Vifter, pumper og teknisk utstyr slik som PC, serverrom og heis. [18] Netto energibehov viser til bygningens energibehov uten å ta hensyn til virkningsgrad eller systemtap. Levert energi tilsvarer den elektriske energien som leveres til bygget for å dekke deler av energibehovet. Levert energi kan i mange tilfeller være lavere enn netto energibehov, da virkningsgrad vil være avgjørende. For eksempel vil varmepumper avgi mer energi enn den behøver for å kjøres. [19] SN-NSPEK 3031:2021 skal benyttes som grunnlag ved beregning av bygningers energibehov og energiforsyning. [20]

2.4 Energisystem

De to mest benyttede måtene å få dekket det elektriske behovet til et bygg er enten ved å benytte elektrisitet fra strømmettet, eller installere solceller på tak og fasader på bygget. For å unngå bruk av høyverdig energi til oppvarming og kjøling kan det benyttes lavverdig energi, slik som varmepumper og fjernvarme.

2.4.1 Solceller

Solceller omdanner solenergi til elektrisk strøm, og kan derfor benyttes som kraftforsyning til bygninger. Solcellene består av to halvledere mellom to elektroder. Positive ladninger samles på den ene halvlederen, mens de negative ladningene samles på den andre halvlederen. Når fotoner i lyset fra solen treffer overgangen mellom de to halvlederne, vil disse erstatte elektronene på den positive halvlederen. Det vil da dannes elektrisk strøm. Se figur 2.1 for oppbygging av en solcelle. Det brukes en inverter for å konvertere likestrøm til vekselstrøm, slik at strømmen kan føres ut på nettet. [1]



Figur 2.1: Oppbygging av silisumsolcelle. [1]

Det vanligste halvledermaterialet er silisium. Silisiumsolkceller har en teoretisk virkningsgrad på 28 %, men i praksis ligger den ofte på mellom 15 og 24 %. [1] Et solcelleanlegg har en levetid mellom 25 og 30 år, men det er sannsynlig at inverteren må byttes ut én til to ganger i løpet av levetiden. [21]

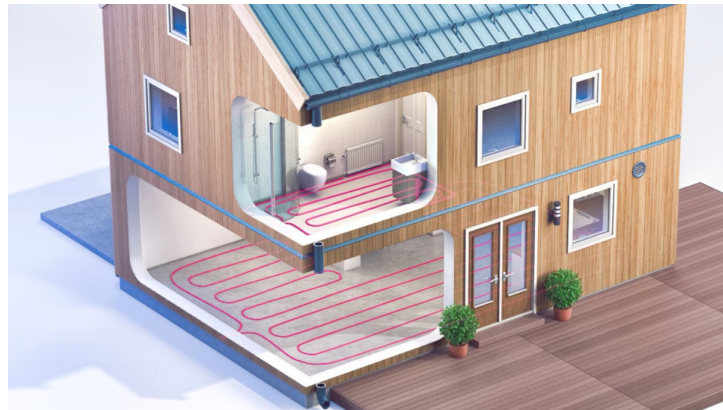
Optimal vinkling er viktig for at solcellene skal kunne fange opp mest mulig sollys. Vinklingen er avhengig av blant annet årstid, lokasjon og nabobygg. Om sommeren er det generelt sett vinkling mellom 35 og 40 grader som er optimalt for strømproduksjon i Norge. [22]

Lønnsomheten til solceller er avhengig av strømprisene, og høye strømpriser vil gjøre investeringen av solceller lønnsom. Lave strømpriser medfører at solcelleinvesteringen ikke er like lønnsom, men til gjengjeld har solcellene nesten ingen vedlikeholdskostnader. [21] I perioder med overskudd, ofte i sommerhalvåret, kan vekselstrøm fra solcellene leveres til nettet. På samme måte kan strøm kjøpes fra nettet dersom solcellene ikke produserer nok, ofte i vinterhalvåret. [1]

2.4.2 Vannbåren varme

Vannbåren varme er varmt vann som sirkulerer rundt i bygget via rør i gulv eller gjennom radiatorer. Vannbåren varme egner seg godt for å få jevn og god fordeling av varmen i hele bygget. Varmekilden kan være luft/vann-varmepumpe, væske/vann-varmepumpe, biokjel eller solfangere, og gir dermed stor fleksibilitet med tanke på valg av fornybar varmekilde. Ved å benytte gulvvarme vil varmen fordeles jevnt over et større område, og vil derfor være et bedre alternativ enn radiatorer. Temperaturen styres enten med

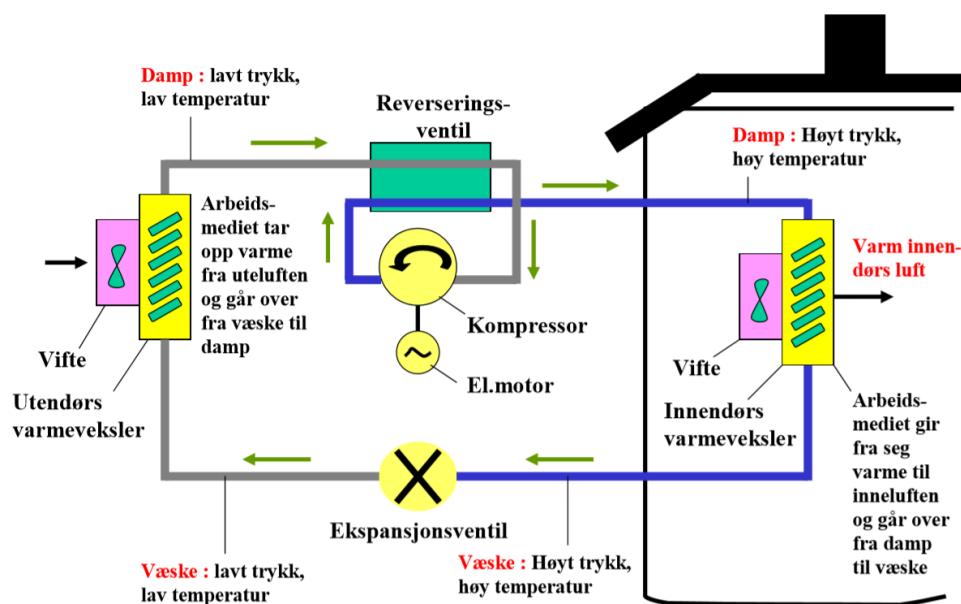
tradisjonell romtermostat eller et sentralt varmestyringsanlegg. [2] Figur 2.2 viser hvordan et vannbårent gulvvarmeanlegg kan benyttes i en bolig.



Figur 2.2: Utklipp vannbåren varme. [2]

2.4.3 Varmepumpe

En varmepumpe er et anlegg som kan benyttes til både oppvarmings- og kjølebehov, ved at den pumper varme fra et sted til et annet. Varmepumpen består i hovedsak av en kompressor, en kondensator, en reduksjonsventil og en fordamer. [23] Se figur 2.4 for prinsipptegning av varmepumpe.



Figur 2.3: Oppbygging av varmepumpe. [3]

Det finnes mange ulike varmepumper på markedet, der betegnelsen forklarer hvor varmen hentes fra og hvor den leveres til. For kontorbygninger er det vanlig å benytte seg av et vannbårent varmeanlegg, og dermed er det væske/vann- og luft/vann-varmepumper

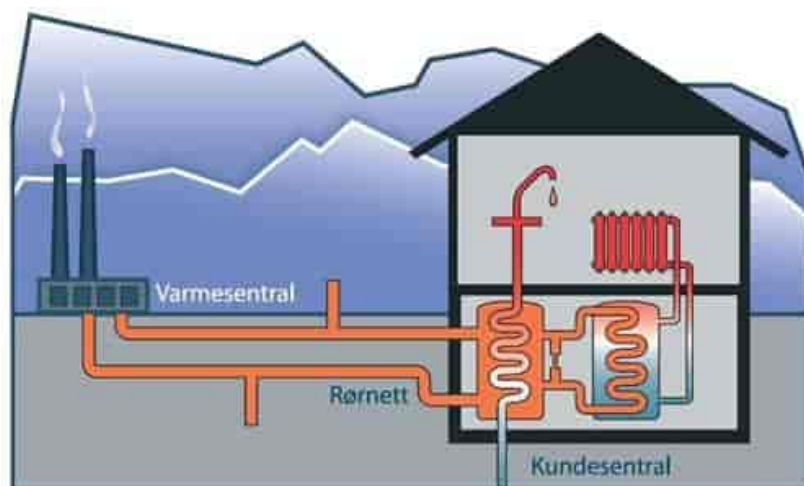
som er aktuelle. Disse varmepumpene kan også benyttes til forvarming av tappevann. Væske/vann-varmepumper henter varme fra en energibrønn i jord, sjø eller berg. [24] Et plastrør med væske senkes ned i energibrønnen og henter ut varmen fra brønnen. Varmen føres så inn i varmepumpen som hever temperaturen, før varmen sendes ut til det vannbårne systemet. For å benytte varmepumpen til kjøling kjøres sirkulasjonspumpa som flytter væske opp og ned i brønnen. Denne metoden kalles frikjøling, men varmepumpen kan også benyttes som en kjølemaskin dersom det er behov for det. [?] Energibrønner har levetid opp mot hundre år, og krever ingen vedlikehold. [25]

I Norge er det bergvarmepumpe som er mest utbredt [23]. En bergvarmepumpe kan ha en teoretisk årlig virkningsgrad (SCOP) mellom 4-5, med en levetid på 20 år. Dekningsgraden vil kunne ligge på omtrent 85 % for romoppvarming og varmt tappevann. [24] Det er vanlig å dimensjonere varmepumper slik at de dekker grunnlasten, omtrent 50-60 % av det maksimale effektbehovet. [26]

En luft/vann-varmepumpe henter varme fra uteluften, ved å benytte en vifte som trekker luft inn. Varmeenergien fanges opp av varmepumpen, og varmen heves inne i varmepumpen før den leveres gjennom det vannbårne systemet. At varmepumpen bruker uteluft gjør den svært enkel å benytte, da varmekilden er tilgjengelig overalt. [27] For å benytte en luft/vann-varmepumpe til kjøling suppleres installasjonen med en viftekonvektor [28]. Vanlig levetid for luft/vann-varmepumpe er 15 år, med SCOP på 2-3. Omtrent 75 % av energiforbruk til oppvarming og varmt tappevann kan dekkes med en luft/vann-varmepumpe. Spisslast dekkes da ofte av olje, elektrisitet eller gass. [29]

2.4.4 Fjernvarme

Fjernvarme er et oppvarmingssystem som kan varme opp bygninger gjennom vannbåren gulvvarme eller radiatorer, samt varmt tappevann. Energikilden i varmesentralen kan være avfallsforbrenning, gass, olje, flis, strøm eller overskuddsvarme fra industri. [4]



Figur 2.4: Prinsippskisse av fjernvarmeanlegg. [4]

I Trondheim er det Statkraft Varme AS som står for levering av fjernvarme til 13 000 kunder. Omtrent 75 % av den produserte energien kommer fra avfallsforbrenning, mens de resterende prosentene blant annet er bioenergi, varmepumper og deponigass. Mer enn 30 % av oppvarmingsbehovet i Trondheim og Klæbu er dekket av fjernvarme. [30]

Siden kostnadene per kunde synker med økt utnyttelse av kapasiteten, er det nødvendig at mange kunder er tilknyttet fjernvarmenettet for å kunne bygge ut fjernvarme i et område. Tilknytningsplikt er dermed et verktøy kommunen kan benytte for å tilrettelegge for fjernvarme. Dersom det er gitt konsesjon for fjernvarme, kan kommunen bestemme at nye bygg i et område skal være tilknyttet fjernvarmenettet. [11]

2.4.5 Elektrokjel

En elektrokjel er en varmtvannsakkumulator som benytter elektrisk motstandsovn eller elektrodekjel til oppvarming. Den er egnet for anvendelser med kort brukstid, slik som ved forsyning til spisslast, da driftskostnadene er avhengig av strømprisen, og høy strømpris medfører høye driftskostnader. [31] Virkningsgraden ligger vanligvis mellom 98-99 % for en elektrokjel, med en levetid på 20 år. Fordelen med å benytte en elektrokjel er at den har lave investeringskostnader, lave vedlikeholdskostnader og et bredt reguleringsområde. I tillegg er det lavt støynivå og ingen utslipp til luft. En elektrodekjel har typisk effektområde mellom 5 og 80 MW. [32]

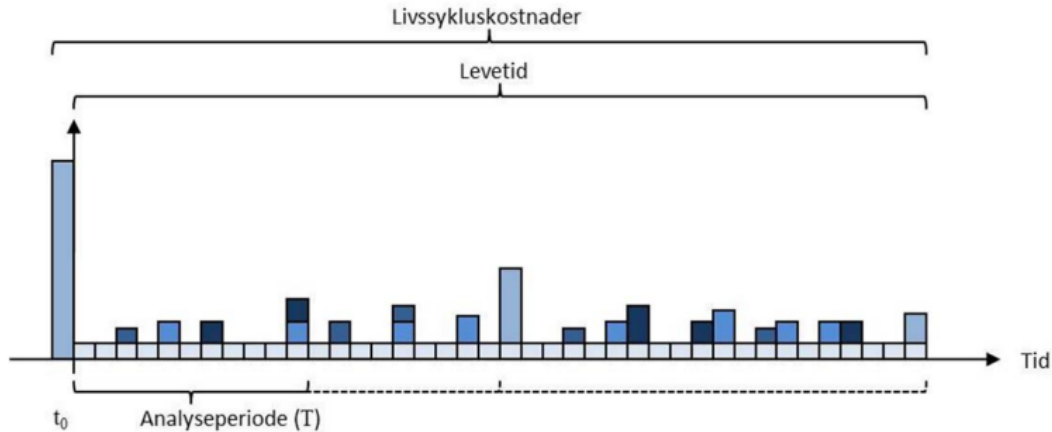
2.4.6 Kjølemaskin

En kjølemaskin er i prinsippet det samme som en varmepumpe. En kompressorkjølemaskin lager kjøling basert på elektrisitet. Trykket i kjølemaskinen øker ved hjelp av en kompressor, slik at kjølemediet avgir varme til omgivelsene. Trykket reduseres gjennom en ventil, og kokepunkttemperaturen synker så lavt at omgivelsene kjøles ned. For en kjølemaskin vil elektrisitetsforbruket ligge mellom 30-40 % av kjølebehovet. [33]

2.5 LCC

Livssyklus kostnader (LCC - Life Cycle Costs) for et bygg er alle kostnader som genereres for en bygningsdel eller byggverk. Det er NS 3454:2013 som benyttes som underlag ved utføring av LCC, hvor kalkulasjonsmetodikken i standarden tar utgangspunkt i nåverdimetoden. [5]

Ved beregning av LCC-kalkylen velges en analyseperiode (T), og det fastsettes et basisår (t_0) for kalkylen som alle kostnader diskonteres til. Se figur 2.5 for valg av T og t_0 . Kostnadene (K_t) oppgis i faste priser med referanse til en bestemt dato som oppgis i forbindelse med kalkylen. Dersom kostnadsposter antas å ikke følge den generelle prisstigningen, skal disse justeres for antatt prisutvikling som avviker fra den generelle. Kostnadene i kalkylen oppgis med negativt fortegn, mens eventuelle restverdier eller besparelse oppgis med positivt fortegn. Kalkulasjonsrenten (r) skal ivareta justering for normal prisutvikling (inflasjon). Det er vanlig å benytte realrente (nominell rente korrigert for inflasjon), eventuelt med tillegg for risiko. [5]



Figur 2.5: Analyseperiode for beregning av LCC-kalkyle. [5]

For å finne eventuell restverdi benyttes ligning [1]. Restlevetid henviser til antall år som er igjen av antatt levetid for energiteknologi når analyseperioden er slutt.

$$\text{restverdi} = \frac{\text{utskiftingskostnad}}{\text{levetid_energiteknologi}} \cdot \text{restlevetid} \quad (1)$$

For å finne nåverdien (NV) multipliseres fremtidig kostnad (K_t) med diskonteringsfaktoren (d_t), se formel [2] for beregning av diskonteringsfaktoren. [5]

$$d_t = \frac{1}{(1+r)^t} = (1+r)^{-t} \quad (2)$$

Summen av nåverdier av kostnader i analyseperioden (NV_T) beregnes som vist i formel [3]. Nåverdien kan kalkuleres for kostnadskomponent, per bygningsdel eller som en samlet sum. [5]

$$NV_T = \sum_{t=0}^T K_t \cdot d_t \quad (3)$$

2.6 Kostnader

I tillegg til investerings- og driftskostnader, må det beregnes en energikostnad for å kunne regne på nåverdien. Energifkostnadene som benyttes i nåverdiberegningen bestemmes blant annet av strømpriser.

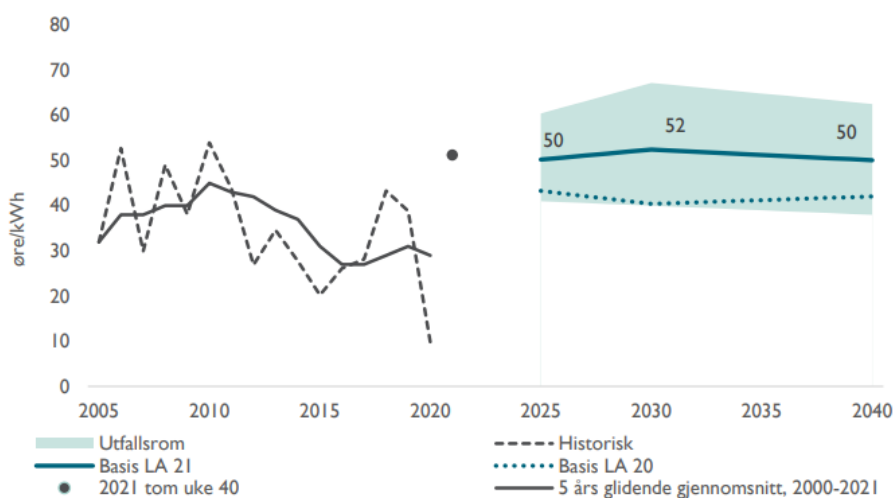
2.6.1 Energifkostnader

Høsten 2021 lanserte NVE sin rapport, «Langsiktig kraftmarkedsanalyse 2021 - 2040», som er en analyse av hvordan kraftsystemet i Norge og Europa utvikler seg mot 2040. Utviklingen av kraftmarkedet i Europa drives i hovedsak av klimapolitikk og teknologisk utvikling. EUs beslutning om å oppjustere utslippsmålene for 2030 har allerede bidratt

til å heve CO_2 -prisen, og gitt utslag i kraftprisene i Norge. En sentral del av klimaomstillingen er å erstatte fossile energikilder med fornybar kraft, som innebærer at energi- og kraftsektoren blir mer integrert. Dette vil medføre at forhold utenfor kraftmarkedet vil få enda større innvirkning på kraftmarkedet, og dermed gjøre det mer krevende å fremskrive utviklingen. Siden klimaomstillingen driver utviklingen i retning av høye CO_2 -priser og økt kraftforbruk, vil dette medføre økte kraftpriser. Likevel vil utbygging av mer kraftproduksjon bidra til reduserte kraftpriser. [6]

I rapporten kommer det frem at det forventes økt gjennomsnittlig spotpris i Norge frem mot 2040. Spotprisen vil være væravhengig, og vil kunne variere mye på kort tid. Mye nedbør og varmt vær vil bidra til lav spotpris, mens lite nedbør og kaldt vær vil føre til økte priser. Det anslås i analysen at gjennomsnittlig årlig spotpris i Norge i 2040 vil ligge på 50 Øre/kWh . Dette er en økning fra 2020 da NVE anslo en gjennomsnittlig årlig spotpris på 41 Øre/kWh i 2040, og 31 Øre/kWh i 2022 [34]. Grunnen til dette er økt utvekslingskapasitet mellom Norden og Europa, og at det legges til grunn vedvarende høye CO_2 -priser. [6]

Figur 2.6 viser historiske årlige gjennomsnittspriser (grå, stiplet linje) i Norge fra 2005 til 2020, og forventet gjennomsnittlig norsk spotpris (blå, heltrukken linje) fra 2025 til 2040. NVEs analyse fra 2020 er vist med blå stiplet linje, mens blått skravert felt viser utfallsrommet til spotprisen gitt av endring i CO_2 -priser. [6]



Figur 2.6: Historiske spotpriser og utvikling i gjennomsnittlig spotpris Norge. [6]

Vintersesongen 2021/2022 har vært preget av skyhøye strømpriser, med en spotpris på 182,1 Øre/kWh i Sør-Norge og 15,0 og 13,5 Øre/kWh i henholdsvis Midt- og Nord-Norge i uke 12 i 2022. I tillegg til høye CO_2 -priser og store variasjoner i kraftproduksjonen, er krigen i Europa en medførende faktor til økte spotpriser i Norge. [35] Russlands invasjon av Ukraina medfører at mange europeiske land ønsker å frigjøre seg fra avhengigheten av russisk gass, og dermed påvirkes prisdannelsen, debatten og energipolitikken i Norge. [36]

I Trondheim er det Tensio som forsyner byen med strøm. For å få transportert strøm til bygget må det betales nettleie til netteier, som i dette tilfellet er Tensio. Nettleia skal dekke kostnader til utbygging, drift, vedlikehold og overvåking av strømmettet, samt dekke statlige avgifter. Nettleiepriser for bedrift fra 01.04.2022 finnes i avsnittet «NMT Effekt Lavspent - alle lavspentsprodukter». Her er energipris på 3,9 Øre/kWh, effektpris vinter på 30 kr/kWh/mnd og effektpris sommer på 21 kr/kWh/mnd. Effektprisen tar utgangspunkt i effekt på 400+ kW, basert på beregnet total elektrisk effekt fra simuleringsprogram. [37] For å finne spotpriser på timesnivå for et helt år kan historiske data, for valgt lokasjon, fra Nord Pool benyttes [38].

2.6.2 Investerings- og driftskostnader

Investeringskostnader for de ulike energiteknologiene kan hentes fra NVEs rapport, «Kostnader i kraftsektoren del 1», fra 2015. Disse investeringskostnadene er basert på tall fra Norsk Prisbok, Holte Kalkulasjonsnøkkel, eller estimat basert på erfaringstall fra Multiconsult. Erfaringstallene er hentet fra tilbud i rehabilitering- og nybyggprosjekter. Prisene er basert på norske 2014-kroner, uten å inkludere skatter og avgifter. [39]

Driftskostnadene deles opp i faste og variable kostnader. Faste kostnader vil være 2-4 % av investeringskostnadene. De variable kostnadene kan være kraftpris, nettleie, el-avgift og brenselpriser. Driftskostnadene vil derfor variere avhengig av de nevnte variable faktorene. [26]

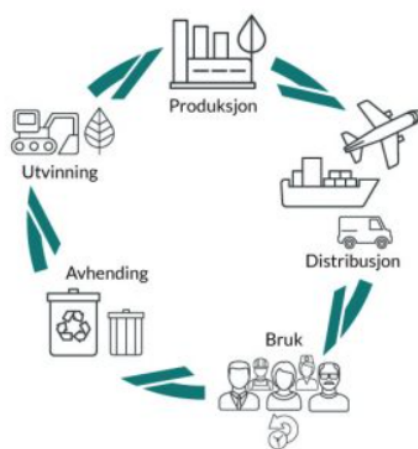
2.6.3 Kalkulasjonsrente

For å kunne gjøre simuleringer i PyCESO og lønnsomhetsberegninger må det fastsettes en kalkulasjonsrente, også kalt diskonteringsrente. Denne renten benyttes for å kunne sammenligne og summere nytte- og kostnadsvirkninger som kan oppstå på ulike tidspunkt. For å omregne alle prissattevirkninger til den verdien de vil ha i et bestemt år, kan diskontering med bruk av kalkulasjonsrente være en systematisk metode å benytte. For statlige tiltak er det satt en risikojustert rente for tre ulike perioder, mens private aktører selv velger en kalkulasjonsrente. For perioder over 40 år vil det være vanskelig å finne en langsiktig rente i markedet, og en reduksjon i kalkulasjonsrenten vil derfor hensynta den økende sikkerheten om alternativavkastningen. For periode 0-40 år er kalkulasjonsrenten satt til 4 %, for periode 40-75 år er den satt til 3 % og etter 75 år er renten 2 %. [40]

I nåverdiberegningene er det nødvendig å bestemme en årlig prisutvikling i energikostnad i prosent. Det fastsettes også en prosentvis årlig lønns- og prisstigning (LPS). Denne prisstigningen skal ta hensyn til lønns- og prisvekst som forekommer i beregningene. I følge SSB var var lønnsøkningen i hovednæringsområde *Faglig, vitenskapelig og teknisk tjenesteyting* på 2,2 % i 2019-2020 og 5,8 % i 2020-2021 [41].

2.7 LCA

Livssyklusanalyse (LCA - Life Cycle Assessment) er en metode for å kartlegge og vurdere miljø- og ressurspåvirkninger gjennom hele livsløpet til et produkt/produktsystem, fra råvareutvinning til avhending/gjenbruk. Figur 2.7 viser et produkts livsløp, fra utvinning til avhending. En LCA kan blant annet brukes for å finne de mest miljøvennlige løsningene i et prosjekt, og miljødeklarasjon (EPD) som beskriver miljøpåvirkningen til et produkt. [7] Det er *NS-EN ISO 14040:2006 Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Prinsipper og rammeverk (ISO 14040:2006)* som beskriver prinsippene og rammeverket for LCA. Standarden inkluderer livsløpsvurderingsstudier (LCA) og livsløpsregnskapsstudier (LCI), men beskriver ikke LCA-teknikken i detalj. Metodene for de enkelte fasene av LCA er heller ikke spesifisert.



Figur 2.7: Et produkts livsløp i henhold til LCA. [7]

Miljøpåvirkningen for en miljøprofil for et produkt baseres på sju indikatorer; GWP, ODP, POCP, AP, EP, ADPE og ADPM. GWP (Global Warming Potential) angir akkumulert oppvarmingseffekt i forhold til CO_2 over et valgt tidspunkt, vanligvis en 100-årsperiode. Enheten er oppgitt som $kg\ CO_2eq./kg$, og omtales som CO_2 -ekvivalenter. Utslipp fra forbrenningsprosesser, sementproduksjon og gjødsel er blant utslipp som inngår i GWP og som bidrar til global oppvarming på grunn av økt innhold av klimagasser i atmosfæren.

[42]

I EPD'ene finnes også tabeller for forbruk av ressurser, beskrivelse av hvilke fraksjoner av avfall som oppstår i produktsystemet og beskrivelse av hvilke nyttige strømmer som går ut fra produktsystemet. [42]

Siden Norge er tett koblet opp med det europeiske kraftsystemet, vil noe av elektrisiteten i det norske strømmettet kunne være produsert i et annet land med andre, ikke-fornybare produksjonsteknologier. [43] I NS 3720 er det etablert et felles utgangspunkt for fastsetting av klimagassutslipp fra elektrisitetsbruk. Det skal benyttes to scenarioer, som begge tar utgangspunkt i gjennomsnittet av siste tre års forbruksmiks, med beregnet faktor basert på gjennomsnittet og utvikling for perioden frem mot 2075. Det ene scenarioet er en ren

norsk forbruksmiks (NO) på $18 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$, mens det andre er en europeiske forbruksmiks (EU28+NO) på $136 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$. [44] Forskningscenteret ZEB benytter CO_2 -faktor for fjernvarme på $185\text{-}211 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$, og $130 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$ for elektrisitet fra strømmettet [45]. Dette er tall som også legges til grunn i BREEAM, dersom produsenten ikke kan vise til spesifikk dokumentasjon [17]. Statkraft Varme, som står for levering av fjernvarme, opererer med BREEAM-dokumentasjon fra 2021 for ulike lokasjoner. Fra rapport utgitt 23.02.2022 kommer Statkraft Varme med beregnet klimagassutslipp for 2021 og antagelser for utslipp fra fjernvarme i 2030. Disse er henholdvis på $65,7 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$ og $45 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$. Inkludert i beregningen for 2021 finnes utslippsfaktorer for ulike kilder, disse er presentert nedenfor: [46]

- Spillvarme fra avfall - ingen tall
- Biogass - $0,1 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$
- El til VP - $0,0 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$
- Spillvarme Rockwool - ingen tall
- Kjøp av varme REAS - ingen tall
- Briketter - $0,4 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$
- El-kjel - $22,7 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$
- LPG - $28,3 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$
- LNG - $5,0 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$
- Bio-olje - $0,1 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$
- Fyringsolje - $9,1 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$

I hovedsak finnes det tre metoder for å beregne CO_2 -utslipp fra produksjon av fjernvarme. 1) Ved å ta utgangspunkt i Kyoto-protokollens prinsipper, slik det rapporteres til blant annet norsk, offisiell statistikk. 2) LCA, der det også tas hensyn til oppstrøms-utslipp i verdikjeden for ulike energialternativer i fjernvarmen. Dette gjelder for eksempel for trepellets, der det inkluderes utslipp for skogbruk, transport, prosessering og lignende. For spillvarme fra avfallsforbrenning benyttes prinsippene i NS 3720, samt fra EPDer. Begge disse prinsippene fordeler forbrenningsutslippene fra avfallsbehandlingen til «waste generator», altså at forbrukerne som forårsaker at avfallet forbrennes betaler prinsippet. Dette er den offisielle bransjestandarden for LCA. 3) Lik som metode 2, men for spillvarme fra avfallsforbrenning gjøres det i tillegg et estimat basert på iboende utslipp fra nødvendig utstyr for å utnytte ressursen. [47]

3 Metode

Dette kapittelet tar for seg metodene som er brukt for å løse oppgaven og svare på problemstillingen. Det var nødvendig å innhente informasjon via litteratursøk for å finne ut hvilken litteratur som allerede fantes om temaet, og litteratur som støtter opp om valgene som tas. Videre beskrives simuleringsverktøyene som benyttes for å finne lastprofiler, og hvordan LCC og LCA utføres. Det er også forklart hvilke valg som er tatt i oppgaven, og hvilke begrensninger som gjøres for å kunne begrense omfanget. En beskrivelse av valgt kvalitetssikring finnes i slutten av kapittelet.

3.1 Forskningsdesign

Oppgaven går ut på å optimalisere energikonsept for bygninger ved å benytte seg av et simuleringsverktøy som bruker genererte lastprofiler. Det tar utgangspunkt i at BREEAM-NOR-manualen følges for å oppnå BREEAM-sertifisering for bygget. Dette betyr at beregninger og valg som gjøres skal være i henhold til anbefalinger og krav i manualen.

Et av de viktigste aspektene ved denne oppgaven er å benytte seg av lastprofiler på timesnivå for å simulere valgt energikonsept. Ved å benytte seg av timesverdier vil muligheten for å sammenligne produksjonsprofiler og forbruksprofiler øke. Det er viktig at produksjons- og forbruksprofilene følger hverandre, altså at det produseres mest når det er høyest forbruk. En årssimulering, som det er vanlig å benytte, tar kun hensyn til at det årlige forbruket dekkes av den årlige produksjonen. For å kunne ha et sammenligningsgrunnlag for lastprofiler på timesnivå benyttes to ulike simuleringsverktøy. Dette anses å være de mest aktuelle verktøyene for å finne lastprofil til et kontorbygg. Videre kjøres de ulike alternativene, med tilhørende lastprofiler, i et program som videre simulerer energisystemene.

For å kunne se på lønnsomheten av de ulike alternativene, utføres det LCC for å beregne kostnader, og LCA for å beregne alternativenes påvirkning på miljøet. Dette gjøres for å kunne velge det eller de alternativene som er mest økonomiske og som har lavt klimautslipp. Videre utføres en følsomhetsanalyse, for å finne ut hvor følsomme resultatene er for endring i strømpris- eller forbruksmik.

3.2 Litteratursøk

For å innhente informasjon er det benyttet to søkemotorer; Google og Google Scholar. Akademisk litteratur er i hovedsak funnet på Google Scholar, mens annen litteratur er funnet ved ordinært nettsøk på Google. For kombinasjon av søkeord er det i hovedsak benyttet oppsett som vist i liste, med varmepumpe som eksempel:

- Varmepumpe
- Bergvarmepumpe
- Bergvarmepumpe levetid
- Bergvarmepumpe COP

- Bergvarmepumpe kostnader

Deler av litteraturen er hentet fra kommersielle aktører som har interesse av å fremme et budskap som gagnar dem. Informasjon fra disse kildene er derfor vurdert opp mot andre kilder for å finne troverdig informasjon.

Det ble i forstudiet brukt tid på å lese seg opp på tilgjengelig akademisk litteratur. Dette innebar å prioritere litteratur publisert de siste fem årene, på grunn av utvikling i bestemmelser fra både Norge og Europa for energikrav i bygg. Akademisk litteratur brukt i forstudiet er «Modelling electric heat load profiles of non-residential buildings for use in long-term aggregates load forecasts», «Modelling occupant behavior in buildings», «Using a segmented dynamic dwelling stock model for scenario analysis of future energy demand: The dwelling stock of Norway 2016-2050», «Clustering methods assessment for investment in zero emission neighborhoods' energy system» og «Characterizing the energy flexibility of buildings and districts» [12, 48-51].

Andre bachelor- og masteroppgaver er også benyttet, men i hovedsak kun anvendt som inspirasjon. Disse har en viss usikkerhet da de ikke vurderes på samme grunnlag som publiserte forskningsartikler. Kildelistene i tidligere oppgaver er brukt for å finne relevante kilder. Det er spesielt to oppgaver som er benyttet som inspirasjon; «Lønnsomhet ved omfattende energioppgradering av et 60-tallshus» og «Bygging av høyhus i tre som et klimatiltak» [52, 53].

Det benyttes også flere standarder i denne oppgaven, hentet fra Standard Norge sin nettside. Standard Norge utvikler og forvalter standarder på de fleste områder i Norge, og har enerett på å utgi Norsk Standard. Standard Norge sikrer at norske interesser blir ivaretatt, gjennom sitt medlemskap i den europeiske standardiseringsorganisasjonen CEN og den internasjonale standardiseringsorganisasjonen ISO. [54]

3.3 Simulerings- og beregningsverktøy

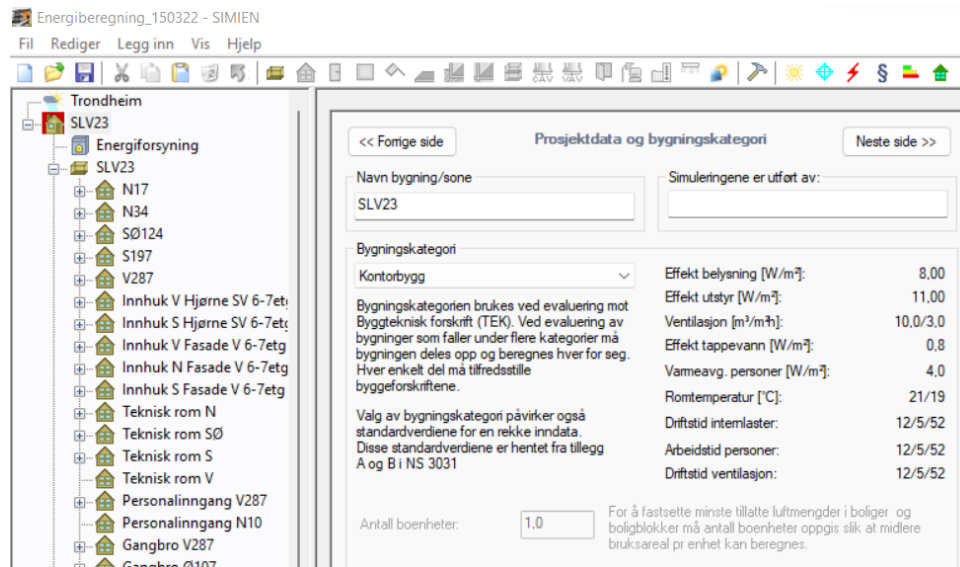
For å kunne sammenligne de genererte lastprofilene til energikonspetene, benyttes to simuleringsverktøy; SIMIEN og PROFet. SIMIEN benyttes også for å finne systemvirkningsgrad inkludert systemtap og verdi på internlast.

3.3.1 SIMIEN

SIMIEN er et simuleringsprogram som benyttes til energiberegning av bygg. Programmet er bygget på den dynamiske beregningsmetoden beskrevet i NS 3031:2014, og det kan gjennomføres dynamiske simuleringer av blant annet energibehov og dimensjonering av oppvarmingsanlegg, ventilasjonsanlegg og kjøling. Programmet kan benyttes til å evaluere bygningen mot energikravene i TEK17 og NS 3700. [55]

Bygningen simuleres ved å legge inn diverse inndataelementer. Dette er blant annet klimasted for bygningen, prosjektdata og valg av energikilder, innlegging av energipriser og virkningsgrader. Bygget deles opp i et antall valgte soner/rom, hvor det må legges inn gulv, vegger, tak, vinduer og dører. Ventilasjonsanlegg, oppvarmings- og kjøleanlegg og

internlaster må deretter beskrives. [56] Se figur 3.1 for utklipp fra SIMIEN, som viser deler av oppsett for simulering.



Figur 3.1: Utklipp fra SIMIEN.

Med alle de nødvendige inndataene på plass, kan det gjøres sju ulike simuleringer; vinter-, sommer- og årssimulering, passivhusevaluering, evaluering mot forskrifter, simulering for energimerking av bygningen og lønnsomhetsberegning av tiltak. En vintersimulering benyttes for å finne nødvendig effekt for romoppvarmingen og varmebatterier i ventilasjonsanlegget. En sommersimulering kan benyttes for å validere inneklimate ved dimensjonerende sommerforhold, samt dimensjonering av ventilasjonsanlegg og romkjøling. I en årssimulering simuleres et helt kalenderår, og netto energiforbruk (energibehov) og levert energi til bygningen beregnes. For å sammenligne bygningen mot kravene i byggforskriftene benyttes evaluering mot forskrifter. Energimerkingen baserer seg på beregnet levert energi og oppvarmingssystem. Det kan også gjøres en passivhusevaluering, hvor bygget evalueres opp mot passivhuskriteriene gitt i NS 3701. Lønnsomhetsberegningene for innlagte tiltak gir resultat av årlig besparelse, nåverdi og internrente, samt energibesparelse og reduksjon i klimagassutslipp. [56]

3.3.2 PROFet

SINTEFs simuleringsverktøy PROFet kan benyttes for å generere aggregerte lastprofiler for el-spesifikt og termisk energibehov. Verktøyet er basert på SINTEFs egen database «tREASURE», som inneholder timesoppløste energimålinger over 1-4 år, fordelt på el-spesifikt behov og varmebehov. Databasen er fordelt på 11 bygningskategorier med 2,5 millioner m^2 bygningsareal fra flere steder og klimasoner i Norge. 27 av byggene i databasen er kontorbygg, hvor to av disse er i kategorien «very efficient». Andre metadata, slik som byggeår, geografisk plassering og bygningskategori, er også inkludert i databasen. [57]

V	W	X	Y	Z
	Floor area [m2] Existing/Renovation		Floor area [m2] New buildings	
Total for neighborhood	Regular	Efficient	Efficient	Very efficient
House				
Apartment				
Office				12 806
Shop				
Hotel				
Kindergarten				
School				
University				
Culture_Sport				
Nursing_home				
Hospital				
Other				
Calculate aggregated profiles (see graphs)				

Figur 3.2: Utklipp fra PROFet som viser bygningskategoriene.

Simuleringsverktøyet er laget i Excel. Det er tre effektnivåer for de 11 bygningskategoriene; «regular», «efficient» og «very efficient». For eksisterende bygninger og rehabilitering er det «regular» og «efficient» som kan velges. For nybygg er det «efficient» og «very efficient» som er tilgjengelige valg. De tre effektnivåene viser til hvilket energinivå bygget er prosjektert etter. Et nybygg som er prosjektert etter TEK 17 eller passivhusstandard vil i teorien tilhøre kategorien «very efficient». Se figur 3.2 for utklipp fra PROFet som viser bygningskategorier og effektnivå. For ett enkelt bygg legges det kun inn størrelse på gulvareal i riktig bygningskategori og energinivå, og klimadata for lokasjon av bygget. Klimadata kan hentes fra nett, og legges inn i kolonnen som heter «Temperatures outdoor». De genererte lastprofilene kan dermed beregnes ved å trykke på knappen merket med «Calculated aggregated profiles». [57]

3.3.3 PyCESO

Python for Power System Analysis (PyPSA) er et simuleringsverktøy i Python som benyttes for simulering og optimalisering av moderne kraftsystemer. Verktøyet kan blant annet benyttes til å beregne statisk og lineær optimal kraftflyt. Siden PyPSA er et Python script benyttes følgende packages for å kunne gjennomføre beregninger [58]:

- *pandas* for å lagre data om komponenter og tidsserier

- *numby* og *scipy* for beregninger
- *pyomo* for å forberede optimaliseringsproblem
- *plotly* for interaktiv plotting
- *matplotlib* for statisk plotting
- *cartopy* for å plote grunnlagskartet
- *networkx* for nettverksberegninger
- *py.test* for enhetstesting
- *logging* for å administrere meldinger

Multiconsult har videreutviklet konseptet som benyttes i PyPSA for å kunne simulere energisystem i bygg. Dette verktøyet kalles PyCESO, og benyttes per i dag kun av Multiconsults egne folk. I PyCESO benyttes et Excel-ark for å fylle inn inndata, som deretter kjøres i Python. PyCESO kan kjøres på flere måter for å simulere energikonsept for bygninger; enten ved å selv bestemme et energikonsept eller la PyCESO bestemme energikonsept basert på strømpriser og effektbehov ved å legge inn et utvalg energiteknologier som det kan velges mellom. I denne oppgaven bestemmes energikonsept selv, slik at energiteknologi for oppvarmings- og kjølebehov, samt elektrisk behov, dekkes av valgte løsninger i henhold til beregnet grunnlast og spisslast. Figur 3.3 viser eksempel av oppsett for et energisystem som inkluderer solceller, varmepumpe, elkjel, fjernvarme og solfanger. De oransje feltene endres for hvert tilfelle, slik som investeringskostnader, kapasitet og økonomisk levetid. Resultat fra denne simulering er blant annet lønnsomhet ved installering av solceller og beregnet årlig energiforbruk. Siden PyCESO ikke er tilgjengelig for allmenn bruk, vil ikke videre metode beskrives i denne oppgaven.

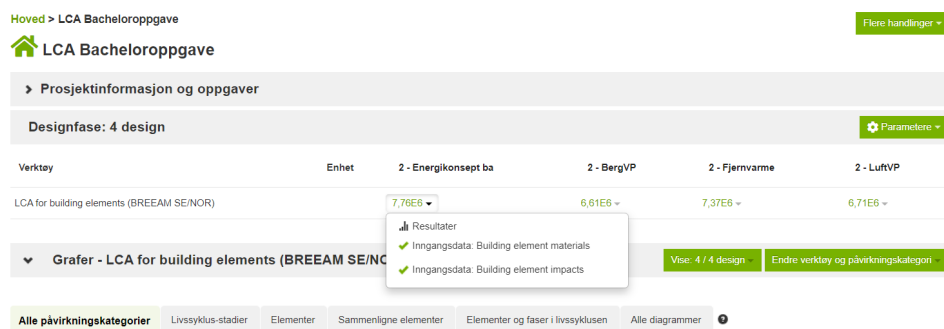
	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Economic calculations									
Investment horizon	years		15						
Applied interest	percent		3 %						
Example components									
		Solar PV*	Solar PV Facade*	Lithium Battery	Heatpump	Boiler	District heating	Solar Wall	
Investment costs	NOK	11 494 000	13 136 000	2 500 000	350 000	100 000	1 050 000	9 852 000	
Reinvestments	NOK	260 000,00	260 000,00	-	-	-	-	-	
Reinvestment year	years	10,00	10,00	-	-	-	-	-	
PV reinvestment	NOK	193 464	193 464	-	-	-	-	-	
Investment costs (incl reinvestment)	NOK	11 687 464	13 329 464	2 500 000	350 000	100 000	1 050 000	9 852 000	
Investment costs per unit	NOK	7000	8000	5000	3500	1000	3500	6000	
Size	unit	1642	1642	500	100	100	300	1642	
Unit		kWp	kWp	kWh	kW	kW	kW	kW	
Economic life	years	30	30	15	30	30	30	30	
OPEX per unit	NOK/yr/unit	15,22533496	15,22533496	50	250	250	83,33333333	15,22533496	
CRF	factor	0,05102	0,05102	0,08377	0,05102	0,05102	0,05102	0,05102	
Annualized investment costs	NOK/y	596 286	680 059	209 416	17 857	5 102	53 570	502 642	
OPEX	NOK/y	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000	
Total annualized costs	NOK/y	621 286	705 059	234 416	42 857	30 102	78 570	527 642	
Total annualized costs per unit	NOK/yr/unit	378,37	429,39	468,83	428,57	301,02	261,90	321,34	
Comment									
* Modelling operations of first year only, no degradation applied									
Assumption:									
economic_calculations buses grid grid_price energy_price energy_price_t generators generators_t store links links_t lc ...									

Figur 3.3: Utklipp fra PyPSA som viser oppsett av økonomiske inndata.

3.3.4 One Click LCA

For å utføre en LCA kan programmet One Click LCA benyttes. Det er Norsk Standard for klimagassberegninger, NS 3720, som legges til grunn for LCA i Norge. One Click LCA tar utgangspunkt i denne standarden, og programvaren kan dermed benyttes for å beregne klimaspør for bygninger i tråd med norske krav. Programvaren kan benyttes for å analysere og kommunisere utslippskonsekvenser ved planlegging og prosjektering av bygg, både for moduler og totalt. I denne oppgaven vil One Click LCA kun benyttes for de valgte energisystemene, ikke det totale bygget. Programvaren kan også benyttes til å tjene BREEAM-NOR-poeng. [59]

Det første som gjøres i programmet er å velge verktøy og legge inn informasjon om referansebygget. Dette inkluderer hvilken LCA-beregningsmetode som skal benyttes, type bygg og bruttoareal. Videre kan det legges inn ulike energikonsept for bygget. Hvert konsept må ha inndata for kalkulasjonsperiode og bygningsmaterialer i «Building element materials». Siden One Click i denne oppgaven kun skal benyttes til de ulike energikonseptene, vil bygningsmaterialer i dette tilfellet blant annet være varmpumpe og elkjel. Videre bestemmes ønsket forbruksmiks, som legges inn i programmet sammen med verdi for levert energi under «Building element impacts». Figur 3.4 viser oppsett for bygning med tilhørende energikonsept som skal benyttes i denne oppgaven. Under hvert konsept kan inndata endres ved å trykke på de lysegrønne verdiene, hvor det kommer opp en rullgardinsmeny.



Figur 3.4: Utklipp fra One Click LCA som viser oppsett av bygget.

Etter at inndata er valgt og satt inn, setter programmet opp ulike grafer for de ulike påvirkningskategoriene. Grafene kan benyttes for å tydeliggjøre forskjellene i klimagassutslipp mellom de valgte konseptene. Grafene kan blant annet vise størrelse på påvirkning fra materialer og årlig energiforbruk.

3.4 Dataanalyse

Etter gjennomføring av simuleringer i PyCESO vil det gjennomføres dataanalyse av resultatene som fremkommer. Valg av videre simuleringer og beregninger vil bli gjort på grunnlag av resultatenes troverdighet. I dette tilfellet vil det gjøres en vurdering om lastprofiler fra både SIMIEN og PROFet skal benyttes videre, eller om en av simuleringstøytene skiller seg klart ut som den mest teoretisk riktige.

3.5 Begrensning

I forprosjektet ble det satt opp fem ulike alternative energiteknologier som var relevante til bruk av oppvarmings- og kjølebehov til kontorbygget. For å begrense oppgaven ble BergVP, Fjernvarme og LuftVP valgt, da disse anses å være mest relevante i kontorbygg på Sluppen i Trondheim, som skal ha oppvarming og kjøling med vannbåren varme. Et alternativ med fjernvarme og fjernkjøling ble besluttet skrotet, da Statkraft Varme i Trondheim ikke tilbyr fjernkjøling. Dette vil likevel være et mulig alternativ i en annen by som kan tilby fjernkjøling.

Det var også satt opp et referansealternativ, som kun benyttet seg av elektrisitet til både oppvarming- og kjøling. For å begrense oppgaven ble det besluttet å fjerne dette alternativet. I henhold til TEK 17 er en løsning med kun elektrisitet heller ikke lenger lovlig.

For å begrense arbeidet med LCA, er det kun GWP som beregnes ved hjelp av One Click LCA. Det ble bestemt at programvaren One Click LCA skal benyttes i stedet for EPDer for de ulike teknologiene, da dette vil spare tid. Et visst antall CO_2 -ekvivalenter for hvert alternativ vil dermed finnes ved bruk av nevnt programvare.

3.6 Kvalitetssikring

For å kvalitetssikre det arbeidet som gjøres er godt samarbeid med veileder og andre involverte i oppgaven viktig. Kvalitetssikring av inndata, slik som kostnader, levetid og virkningsgrad, gjøres av Elisabeth Wærnes og Carl Godager Kaas fra Multiconsult. Denne kvalitetssikringen vil gå ut på å sammenligne erfaringstall med de antatte og beregnede verdiene. Videre er simuleringer i PyCESO gjort av Torje Evensen i Multiconsult, som til daglig jobber med dette. I samarbeid med Solveig Heggvoll fra Multiconsult kvalitetssikres verdier hentet fra SIMIEN, beregning av LCC og LCA.

4 Case

I dette kapittelet finnes det en beskrivelse av de tre ulike alternativene som skal simuleres. Alternativene er basert på teknologier som ofte er brukt i nye kontorbygg, hvor det er bestemt at det skal benyttes vannbåren varme. De tre alternativene er:

- **BergVP**
- **LuftVP**
- **Fjernvarme**

De to varmpumpe-alternativene benytter varmpumpe og elkjel for å dekke oppvarmings- og kjølebehov både for grunnlast og spisslast. Det som skiller disse løsningene er at det i BergVP benyttes en bergvarmpumpe, mens det i LuftVP benyttes en luft/vannvarmpumpe. I Fjernvarme brukes det i hovedsak fjernvarme for å dekke oppvarmingsbehov både til romoppvarming og tappevann. Det benyttes en kjølemaskin for å dekke kjølebehovet.

Hvert av alternativene skal simuleres i PyCESO med to ulike lastprofiler, hvor den ene er hentet fra SIMIEN og den andre fra PROFet. Et totalt antall på seks alternativer skal derfor simuleres, og deretter gjøres det LCC og LCA for de ulike alternativene.

Et bygg prosjektert av Multiconsult benyttes for å kunne innhente data til simulering. Dette bygget er lokalisert på Sluppenveien 23 i Trondheim, og går under navnet ALO. ALO er et kontorbygg over syv etasjer, med passivhusstandard og et bruttoareal på 12 806 m^2 . Etasjeplanene er fleksible med tanke på planløsning for å kunne romme åpent landskap, cellekontor, møterom og sosiale soner. Det vil i tillegg legges til rette for innendørs sykkelparkering, treningsrom, garderobes og personalrestaurant. Kontorbygget vil være det første dobbeltsertifiserte kontorbygget i Norge, med miljøstandardene BREEAM Outstanding og Well Platinum. Bygget er under oppføring og vil være innflytningsklart våren 2023. [60] I denne oppgaven vil SIMIEN-fila som er opprettet for bygget benyttes for å innhente data, samt brukes til gjennomføre en årssimulering.

4.1 Solceller

For å dekke det elektriske behovet, ses det på muligheten for å benytte solceller på tak og fasade. Faglig ressurs i Multiconsult har funnet nødvendig inndata for solcellesystemet. For å bestemme potensialet for solenergiproduksjon utføres det en simulering i programvaren PVsyst (versjon 7.2.6). Programvaren har en stor database med solcellekomponenter til bruk i simuleringen, og med avanserte funksjoner for å kartlegge tap i solcelleanlegget. Siden kraftproduksjonen til solcelleanlegg er svært avhengige av lokal innstråling, samt vinkel mellom solcellemodulene og solinnstrålingen, benyttes klimadata fra Meteororm fra Nidarvoll i Trondheim. I simuleringen legges det til grunn generiske systemkomponenter med solcellemoduler på 20,5 % virkningsgrad, ca. 2 m^2 og en installert effekt på 340 Wp (STC), samt en maksimum virkningsgrad for inverter på 98 %. Gitt modulene

og det øvrige systemet som ble satt opp, vil PVsyst gi resultat for ytelse i kWh/kWp og tidsserier for produksjon.

Tabell 4.1: Kostnader for solcellesystem.

	Kostnader	[kr/kW]	Kommentar
Solceller, tak	Investeringskostnad	7 000	Erfaringstall
	Vedlikeholdskostnad	25 000 (kr/år)	Oppgitt fra solcelle- leverandør som estimat
	Utskiftningskostnad inverter	490	7 % av investeringskostnad
	Levetid inverter (år)	15	
	Utskiftingskostnad fullt solcellesystem	7 000	Antatt lik investeringskostnad
	Levetid solceller (år)	30	
Solceller, fasade	Investeringskostnad	8 000	Erfaringstall
	Vedlikeholdskostnad	25 000 (kr/år)	Oppgitt fra solcelle- leverandør som estimat
	Utskiftningskostnad inverter	560	7 % av investeringskostnad
	Levetid inverter (år)	15	
	Utskiftingskostnad fullt solcellesystem	8 000	Antatt lik investeringskostnad
	Levetid solceller (år)	30	

Tabell 4.1 viser kostnader og levetid for solceller på tak og fasade, samt inverter. Kostnadene er basert på erfaringstall fra Multiconsult. For å finne kapasiteten for solcellene divideres den installerte effekten på 340 Wp med 2 m^2 , og effekten for en modul blir da 170 Wp/ m^2 . Det antas at 90 % av fasaden (ekskludert vinduer) og 80 % av taket kan dekkes med solceller, basert på erfaringstall fra Multiconsult. Fra SIMIEN finnes areal for tak og fasade. Aktivt areal finnes ved å multiplisere andel av fasade og tak som dekkes av solceller med areal. Det er kun sør-, øst- og vestfasade som ønskes dekket med solceller, da disse har mest solinnstråling. Kapasiteten kan så finnes ved å multiplisere aktivt areal med effekten til modulene, dette gjøres så om til kWp ved å dividere på 1000. Se tabell 4.2 for verdier på kapasitet for solceller på tak og fasade.

Tabell 4.2: Beregnet kapasitet for solceller.

	Areal [m^2]	Aktivt areal [m^2]	Kapasitet [kWp]
Tak	1820	1456	247,52
Sør	547,52	492,77	83,77
Øst	775,70	698,13	118,68
Vest	774,63	697,17	118,52

4.2 BergVP

I alternativet med bergvarmepumpe benyttes varmepumpen til romoppvarming, forvarming av tappevann og kjøling. Dekningsgraden for varmepumpen settes til 85 % for romoppvarming og tappevann, og er dimensjonert til å dekke 50 % av det maksimale effektbehovet. Levetid settes til 20 år, med antatt SCOP på 3,5. Det antas at et systemtap vil påvirke virkningsgraden. Systemvirkningsgraden, inkludert systemtap, leses av i SIMIEN-fila, til 3,06. Det antas at virkningsgraden for varmepumpen vil være 2,5 når den benyttes til frikjøling eller som kjølemaskin. Systemvirkningsgraden antas å være 2,0 når det inkluderes systemtap.

For å dekke spisslast for oppvarmingsbehovet benyttes en elkjel, med dekningsgrad på 15 %. Elkjelen vil kunne dekke det maksimale effektbehovet som varmepumpen ikke er dimensjonert for. Levetiden er 20 år, og teoretisk virkningsgrad er antatt til 98 % basert på erfaringstall. Systemvirkningsgrad som inkluderer systemtap er på 86 %.

Det bestemmes at faste driftskostnader skal settes til 3 % av investeringskostnadene, og at utskiftningskostnaden vil ha samme verdi som investeringskostnaden. Investeringskostnadene er hentet fra NVEs rapport «Kostnader i kraftsektoren del 1» fra 2015. Tabell 4.3 viser oversikt over kostnader for alternativet med bergvarmepumpe og elkjel. Investeringskostnadene for væske/vann-varmepumpen inkluderer energibrønn, varmepumpe og VP-spesifikke kostnader, slik som pumper og rør. Utskiftningskostnad og vedlikeholdskostnad vil ikke inkludere energibrønn, da disse erfaringsmessig har mye lengre levetid enn 60 år og er vedlikeholdsfrie. Det antas at vedlikeholdskostnaden for tilpasning av varmepumpe til kjøling er null, da dette inngår i vedlikeholdskostnaden for varmepumpen.

Tabell 4.3: Kostnader for BergVP.

	Kostnader	[kr/kW]	Kommentar
Varmepumpe væske/vann 0,15 MW	Investeringskostnad	13 000	NVE: Tabell 7-18, s. 172
	Vedlikeholdskostnad	165	Antatt 3 % av investeringskostnad for VP
	Utskiftningskostnad	5 500	Kun varmepumpe
Tilpasning VP til kjøling	Investeringskostnad	800	NVE: Tabell 7-18, s. 172
	Vedlikeholdskostnad	-	Antatt lik null
	Utskiftningskostnad	800	Antatt lik investeringskostnad
Elkjel	Investeringskostnad	1 200	NVE: Tabell 7-19, s.173
	Vedlikeholdskostnad	36	Antatt 3 % av investeringskostnad
	Utskiftningskostnad	1 200	Antatt lik investeringskostnad

4.3 LuftVP

For alternativet med luft/vann-varmepumpe settes dekningsgrad til 75 %, og pumpen dimensjoneres for å dekke 50 % av det maksimale effektbehovet. Levetid velges til 15 år, med SCOP på 3,0. Systemvirkningsgrad er funnet til å være 2,62. Systemvirkningsgraden for varmepumpen under frikjøling eller som kjølemaskin antas å være 2,0. Elkjelen vil i dette tilfellet dekke omtrent 25 % av oppvarmingsbehovet. Levetid settes til 20 år, med systemvirkningsgrad på 86 %.

Det benyttes samme antagelser og kilde for investeringskostnader for luft/vann-varmepumpe og elkjel som i bergvarmepumpe-alternativet. Tabell 4.4 viser kostnader for LuftVP inkludert varmepumpe og elkjel.

Tabell 4.4: Kostnader for LuftVP.

	Kostnader	[kr/kW]	Kommentar
Varmepumpe luft/vann 0,15 MW	Investeringskostnad	7 000	NVE: Tabell 7-15, s. 166
	Vedlikeholdskostnad	210	Antatt 3 % av investeringskostnad
	Utskiftningskostnad	7 000	Antatt lik investeringskostnad
Tilpasning VP til kjøling	Investeringskostnad	800	NVE: Tabell 7-18, s. 172
	Vedlikeholdskostnad	-	Antatt lik null
	Utskiftningskostnad	800	Antatt lik investeringskostnad
Elkjel	Investeringskostnad	1 200	NVE: Tabell 7-19, s.173
	Vedlikeholdskostnad	36	Antatt 3 % av investeringskostnad
	Utskiftningskostnad	1 200	Antatt lik investeringskostnad

4.4 Fjernvarme

I alternativet med fjernvarme, dekkes både grunnlast og spisslast for romoppvarming og forvarming av tappevann av fjernvarme. Basert på erfaringstall settes levetid til 50 år, og virkningsgrad til 98 %. Fra SIMIEN er systemvirkningsgrad inkludert systemtap beregnet til 86 %. For å dekke kjølebehovet benyttes en kjølemaskin. Antatt virkningsgrad er satt til 2,5 og levetid til 20 år, basert på informasjon fra faglig ressurs i Multiconsults VVS-avdeling.

Kostnader for alternativet med fjernvarme og kjølemaskin er vist i tabell 4.5. Investeringskostnadene for fjernvarmesentral inkludert kundesentral, og kjølemaskin er basert på erfaringstall fra Multiconsult. Det antas også her at vedlikeholdskostnadene er 3 % av investeringskostnadene, og at utskiftningskostnad vil være lik investeringskostnadene.

Tabell 4.5: Kostnader for Fjernvarme.

	Kostnader	[kr/kW]	Kommentar
Fjernvarmesentral inkl. kundesentral	Investeringskostnad	2 500	Erfaringstall
	Vedlikeholdskostnad	75	Antatt 3 % av investeringskostnad
	Utskiftningskostnad	2 500	Antatt lik investeringskostnad
Kjølemaskin	Investeringskostnad	2 400	Erfaringstall
	Vedlikeholdskostnad	72	Antatt 3 % av investeringskostnad
	Utskiftningskostnad	2 400	Antatt lik investeringskostnad

5 Simuleringer og beregninger

Dette kapittelet beskriver fremgangsmåte inkludert innsatte verdier i simuleringsverktøyene, og beregning av lønnsomhet og miljøpåvirkning. Simuleringene i PyCESO er basert på resultat fra lastprofil-simuleringene i SIMIEN og PROFet.

5.1 SIMIEN

I denne oppgaven skal SIMIEN benyttes for å finne forbruksprofiler på timesnivå, og systemtap. En SIMIEN-fil utviklet av Multiconsult for ALO Sluppen benyttes som simulering grunnlag. Det er kun nevnte verdier nedenfor som er endret eller kvalitetssikret i den opprinnelige filen.

Siden det kun er lastprofiler som skal hentes i SIMIEN, settes energiforsyning til elektrisitet. Systemvirkningsgrad for romoppvarming, varmtvann og varmebatterier settes til 1, 0, samt gjennomsnittlig kjølefaktor for romkjøling og kjølebatterier. For ventilasjon benyttes balansert ventilasjon med driftstid 06:00 (am) til 06:00 (pm). Tilluft og avtrekk settes til $6,35 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ i driftstiden, og til $1,0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ utenfor driftstid og i helg/ferie.

Inndata for internlast er belysning, tappevann, teknisk utstyr og personer. Driftsmønster settes til 07:00 (am) til 05:00 (pm) for belysning, teknisk utstyr og varmetilskudd personer. Midlere effekt og varmetilskudd i driftstiden er satt til $4,0 \text{ W}/\text{m}^2$ og 100 % for belysning og $6,0 \text{ W}/\text{m}^2$ og 100 % for teknisk utstyr. Gjennomsnittlig varmetilskudd i arbeidstiden er satt til $4,0 \text{ W}/\text{m}^2$. I SIMIEN antas det at effekten og varmetilskuddet fra vannoppvarmingen er konstant over hele døgnet, og vil derfor være ukorrekte å benytte for bygningskategorier som ikke har 24 timer driftstid.

For oppvarming krysses det av for «oppvarming med vannbårent distribusjonsanlegg», med turtemperatur $38,0 \text{ }^\circ\text{C}$, returtemperatur $32,0 \text{ }^\circ\text{C}$ og spesifikk pumpeeffekt [$\text{kW}/(\text{l}/\text{s})$] på 0,50. Maksimal avgitt effekt [W/m^2] og konvektiv andel avgitt effekt settes begge til 1,0. Driftsmønster settes fra 07:00 (am) til 05:00 (pm), med settpunkttemperatur på $21,0 \text{ }^\circ\text{C}$ i driftstid og $19,0 \text{ }^\circ\text{C}$ utenfor driftstid.

Videre gjøres en årssimulering. Det hukes av for følgende verdier som skal være med i simuleringen; effekt romoppvarming, effekt romkjøling (lokal kjøling), effekt ventilasjonsvarme (varmebatterier), effekt ventilasjonskjøling (kjølebatterier), effekt belysning, effekt utstyr og effekt vifter. Verdiene settes deretter inn i et Excel-ark.

Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8	Column9	Column10
Årssimulering								
SLV23								
11:12	15/3-2022							
Dag	Time	Romoppv.[W]	Vent.varme.[W]	Romkjøling [W]	Vent.kjøling [W]	Effekt belysning [W]	Effekt utstyr [W]	Effekt vifter [W]
1	0	0	33108	0	0	0	0	1779
1	1	0	33448	0	0	0	0	1779
1	2	908	33942	0	0	0	0	1779
1	3	2624	34245	0	0	0	0	1779
1	4	4097	34454	0	0	0	0	1779
1	5	5547	34663	0	0	0	0	1779
1	6	0	167953	0	0	0	0	23718
1	7	10792	119705	0	0	51224	76836	23718
1	8	12806	107196	0	0	51224	76836	23718
1	9	12806	103421	0	0	51224	76836	23718
1	10	6365	99096	0	0	51224	76836	23718
1	11	0	95886	0	0	51224	76836	23718
1	12	0	93598	0	0	51224	76836	23718
1	13	0	91481	0	0	51224	76836	23718
1	14	0	90084	0	0	51224	76836	23718
1	15	0	88033	0	0	51224	76836	23718
1	16	0	86333	0	0	51224	76836	23718

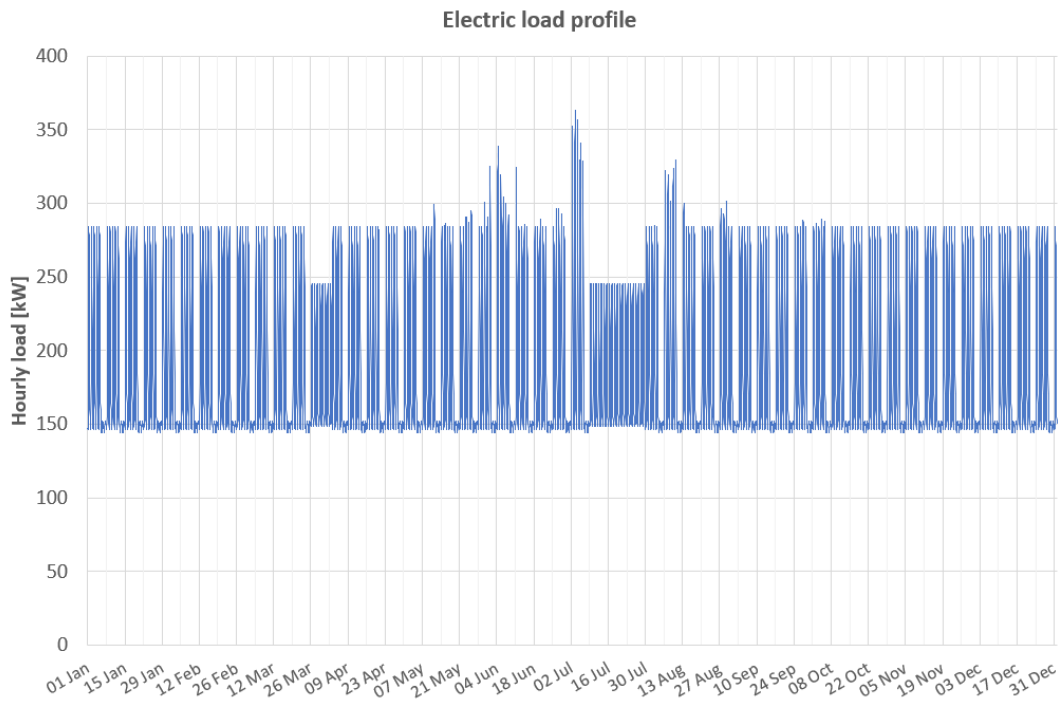
Figur 5.1: Utklipp fra Excel med lastprofil fra SIMIEN.

I Excel-arket er nå lastprofiler på timesnivå for et helt år lastet inn, se figur 5.1 for oppsett av lastprofiler fra SIMIEN i Excel. Videre må det legges inn varmtvannsforbruk per time for kontorbygg, dette hentes fra NS 3031:2012. For å finne det totale oppvarmingsbehovet adderes lastprofiler for romoppvarming, ventilasjonsvarme og varmtvannsforbruk. Det totale kjølebehovet finnes ved å addere romkjøling og ventilasjonskjøling. Effekt belysning adderes med effekt utstyr og effekt vifter for å finne det totale effektbehovet.

5.2 PROFet

For å finne lastprofiler for el-spesifikt og termisk behov i PROFet settes gulvareal på $12\,806\text{ m}^2$ inn under «very efficient» i kategorien «Office» i Excel-arket. Deretter settes timeverdier for temperatur inn i kolonnen «Temperatur outdoor». Timeverdiene er hentet fra seklima.met.no, fra Risvollan målestasjon. For å generere lastprofilene gjenstår det kun å trykke på «Calculated aggregated profiles», resultatene vil vises i kolonnene til høyre for klimadataene.

For å få ut kjølebehov fra PROFet, benyttes verdier for elektrisk last. Figur 5.2 viser graf for elektrisk lastprofil over et helt år, fra hvor det bestemmes en normalverdi for elforbruk. Det antas at stigningen fra normalverdi for elforbruk opp til høyeste verdi for elforbruk er elforbruk til kjøling. Det er ikke tatt hensyn til at det elektriske forbruket er lavere i ferier, og det antas derfor normalverdier også disse ukene. I Excel benyttes «Hvis»-funksjonen for å finne stigningen mellom normalverdi og høyeste verdi. Det benyttes en kjølefaktor på 2,2, som er bransjestandard, som multipliseres med elforbruk til kjøling for å finne kjølebehovet inkludert virkningsgrad. Etter å ha funnet kjølebehovet, trekkes dette fra den elektriske lastprofilen beregnet i PROFet, for å finne elektrisk lastprofil ekskludert kjølebehov.



Figur 5.2: Elektrisk last fra Profet.

5.3 PyCESO

For å kunne simulere i PyCESO fylles excel-arkene ut for hvert alternativ. Levetid settes til 60 år, som er byggets antatte levetid. Basert på erfaringstall settes kalkulasjonsrenten til 4 %. Det antas at strømpriser fra 2019 for Trøndelag kan regnes som normalverdier, og disse derfor benyttes i denne oppgaven.

I alternativene hvor det benyttes varmepumpe og elkjel, dimensjoneres varmepumpen for å dekke grunnlasten og elkjelen for å dekke spisslasten. Typisk dimensjoneringsmetode for varmepumpe i Multiconsult gjøres ved å beregne 25 % av brutto maksimal oppvarmingseffekt og 50 % av netto maksimal oppvarmingseffekt, for deretter å velge den største effekten. Brutto maksimal oppvarmingseffekt finnes fra lastprofil, og internlast finnes i NS 3031. Internlast er hentet fra SIMIEN, som benytter NS 3031, og leses av til 128 kW. Brutto maksimal oppvarmingseffekt fra SIMIEN og Profet finnes ved å benytte «Størst»-funksjonen i Excel fra lastprofil for oppvarming. Fra SIMIEN er brutto maks oppvarmingseffekt funnet til å være 315 kW, og fra PROFet er den 305 kW. Netto maks oppvarmingseffekt beregnes ved å subtrahere internlast fra brutto maks oppvarmingseffekt, se ligning 4 og 5 for beregning.

$$Netto_SIMIEN = 315kW - 128kW = 187kW \quad (4)$$

$$Netto_PROFet = 305kW - 128kW = 177kW \quad (5)$$

Videre viser ligning 6 og 7 25 %-andel av brutto maks oppvarmingseffekt, og ligning 8 og 9 viser 50 %-andel av netto maks oppvarmingseffekt. I begge tilfeller er det 50 % av netto

maks oppvarmingseffekt som gir den høyeste effekten, som benyttes videre i oppgaven.

$$25\%_{brutto_SIMIEN} = 0,25 \cdot 315kW = 78,8kW \approx 80kW \quad (6)$$

$$25\%_{brutto_PROFet} = 0,25 \cdot 305kW = 76,3kW \approx 80kW \quad (7)$$

$$50\%_{netto_SIMIEN} = 0,50 \cdot 187kW = 93,5kW \approx \mathbf{95 kW} \quad (8)$$

$$50\%_{netto_PROFet} = 0,50 \cdot 177kW = 88,5kW \approx \mathbf{90 kW} \quad (9)$$

Brutto maks kjøleeffekt finnes på samme måte som for oppvarmingseffekt ved å bruke «Størst»-funksjonen i Excel. Største kjøleeffekt fra SIMIEN leses av til 130 kW og 220 kW fra PROFet. For å finne den nominelle maksimale effekten for oppvarmings- og kjølebehovet må den dimensjonerte effekten divideres med systemvirkningsgrad. Tabell 5.1 viser oversikt over beregnet maksimal effekt fra SIMIEN og PROFet for de ulike energiteknologiene.

Tabell 5.1: Oversikt over beregnet maksimal effekt.

	Effekt [kW] SIMIEN/PROFet	Systemvirkningsgrad inkl. systemtap	$P_{nom,max}$
VP Væske/vann	95/90	3,06	31/30
VP Luft/vann	95/90	2,62	36/34
Reversibel VP	130/220	2,00	65/110
Elkjel	315/305	0,86	366/355
Kjølemaskin	130/220	2,50	52/88
Fjernvarme	315/305	0,86	366/355

Videre metode av beregninger i PyCESO er ikke gjengitt i denne oppgaven, da verktøyet kun kan brukes av ansatte i Multiconsult. Simuleringene i PyCESO gjøres av Torje Evensen.

5.3.1 Sensitivitet av lønnsomhet for solceller

Simuleringer i PyCESO viser at bruk av solceller velges bort, på grunn av ulønnsomhet. En av faktorene som benyttes som grunnlag ved valg solcellebruk er strømpriser. Det ble i simuleringen benyttet strømpriser fra 2019 for Trøndelag. Videre testes BergVP_sim med strømpriser fra 2017 og 2021, for å kunne se på sensitiviteten til valg av strømpris på lønnsomheten til solcellene. Med 2017-priser vises ingen endring, det er altså ikke lønnsomt med solceller. For 2021 er resultatet annerledes; høye strømpriser gjør bruk av solceller lønnsomt. I dette tilfellet vil solcellene på sørfasaden kunne dekke forbruket best.

For å begrense omfanget av oppgaven, gjøres det ikke videre simuleringer med endret strømpris for de andre alternativene. Det tas utgangspunkt i resultat fra PyCESO-simuleringene med strømpris fra 2019 i videre beregninger.

5.4 Følsomhetsanalyse av inndata fra SIMIEN og PROFet

Siden de ulike simuleringverktøyene ga svært ulike resultat, ble det besluttet at det skulle utføres en følsomhetsanalyse. Se tabell 5.2 for resultat fra SIMIEN og Profet. Til sammenligning er den totale elektriske effekten fire ganger så stor for PROFet som for SIMIEN. I tillegg er nesten alle de andre verdiene fra PROFet det doble av verdiene fra SIMIEN.

Tabell 5.2: Genererte lastprofiler fra SIMIEN og PROFet.

Genererte lastprofiler		
	SIMIEN [kW]	PROFet [kW]
Totalt oppvarmingsbehov	242 153	515 497
Maks. oppvarmingsbehov	315	305
Totalt kjølebehov	7 974	14 414
Maks. kjølebehov	130	220
Total elektrisk effekt	420 301	1 632 739

I Profet ble klimadata hentet fra Risvollan målestasjon for år 2021, mens det i SIMIEN ble benyttet normalverdi for klimadata i perioden 1960-1990. Klimadata benyttet i SIMIEN ble derfor hentet ut ved å gjøre en årssimulering, før dette ble lagt inn i PROFet for å kunne gjøre en sammenligning. Det neste som ble testet var å endre inndata i SIMIEN. Første verdi som ble endret var lekkasjetallet ved 50 Pa trykkforskjell. Denne ble endret fra 0,2 til 0,6, basert på minstekrav i passivhusstandarden. Videre ble størrelse på tilluft/avtrekk i driftstid endret fra $6,35 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ til $7,0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. Det ble ingen betydelig endring i resultatene selv med endrede verdier, se tabell 5.3. Opprinnelige resultat er vist i kursiv. Verdiene i tabell 5.2 benyttes derfor videre i oppgaven.

Tabell 5.3: Resultat fra følsomhetsanalyse for lastprofiler.

Følsomhetsanalyse lastprofiler			
PROFet	Electric hourly [kW]	Oppvarmingsbehov [kW]	
Risvollan målestasjon	<i>1 638 713</i>	<i>515 497</i>	
Klimadata fra SIMIEN	1 634 565	473 917	
SIMIEN	Total effekt [kW]	Totalt oppvarmingsbehov [kW]	Totalt kjølebehov [kW]
Første simulering	<i>420 301</i>	<i>7 961</i>	<i>242 152</i>
Endret lekkasjetall	420 109	7 804	279 983
Endret tilluft/avtrekk	427 417	7 943	295 499

5.5 LCC

For beregning av lønnsomhetskostnadene benyttes et ferdig Excel-ark utarbeidet av Multiconsult for et tidligere prosjekt. Beregningene i dette Excel-arket tar utgangspunkt i metode for beregning av lønnsomhet fra BREEAM-NOR-manualen, se kapittel 2.5. Første ark, «Kostnader og besparelser», inneholder en oversikt over viktige inndata for de ulike alternativene, delt opp med tilhørende lastprofiler. Investerings- og vedlikeholdskostnader er hentet fra tabell 4.3, 4.5 og 4.4. Fra resultatene i PyCESO finnes det årlige energiforbruket. For BergVP er årlig energiforbruk på 534 110 kWh, mens det er på 705 059 kWh for Fjernvarme og 545 385 kWh for LuftVP. For å kunne ha et sammenligningsgrunnlag settes det opp et alternativ som kun benytter panelovner og kjølemaskin, på denne måten vil det være mulig å beregne besparelsene ved å benytte energikonseptene sammenlignet med et grunnscenarior. Det årlige energiforbruket for grunnscenarioret beregnes med lastprofil fra SIMIEN og PROFet, ved å addere elektrisk behov, oppvarmings- og kjølebehov med tilhørende virkningsgrader. Her antas det en virkningsgrad på 92 % for panelovner, basert på erfaringstall fra Multiconsult. Det beregnede årlige energiforbruket vil da være på 686 695 kWh for SIMIEN, og 2 198 827 kWh for PROFet. Vedlikeholds- og utskiftingskostnader settes til null, da det antas at dette er likt som distribusjonsanlegg for de termiske systemene. Se figur 5.3 for oppsett av grunnscenarior og BergVP. Fjernvarme og LuftVP settes opp på samme måte.

Ren el/sammenlignings/grunnscenarior					
Hva/kostnadsdrivende faktorer	Investeringskostnad	Årlig vedlikeholdskostnad	Kostnad ev. utskifting underveis	Årlig energiforbruk (kWh)	
					686 695
BergVP Simien					
Hva/kostnadsdrivende faktorer	Investeringskostnad	Årlig vedlikeholdskostnad	Kostnad ev. utskifting underveis	Årlig energiforbruk (kWh)	
Varmepumpe væske-vann	kr 1 235 000,00	kr 15 675,00			
-Bytte pr 20 år.			kr 522 500,00		
Tilpasning VP til kjøling, væske-vann	kr 104 000,00	kr -			
-Bytte pr 20 år.			kr 104 000,00		
Elkjel	kr 378 000,00	kr 11 340,00			
-Bytte pr 20 år.			kr 378 000,00		
Sum	kr 1 717 000,00	kr 27 015,00	kr 1 004 500,00		534 110

Figur 5.3: Oppsett for grunnscenarioret og BergVP i LCC-beregning.

Videre settes det inn kalkulasjonsrente på 4 %, denne er også benyttet i PyCESO. LPS settes til 2,5 % og årlig prisutvikling energikostnad settes til 3 %, basert på erfaringstall fra Multiconsult. Strøm- og fjernvarmepris baseres på 2019-tallene benyttet i PyCESO, med gjennomsnittlig spotpris på 0,38 kr/kWh, nettleie og effektpris på 0,40 kr/kWh.

De tre energikonseptene deles så inn i nye ark, for å kunne gjennomføre en nåverdiberegning. Arkene navngis etter energikonsept med tilhørende lastprofil. Se figur 5.4 for oppsett av nåverdiberegning for BergVP. Under «Investering dagens verdi» settes investeringskostnad inn i år null, deretter settes det inn utskiftingskostnader. For BergVP byttes varmpumpe og elkjel ut etter 20 år, og utskiftingskostnad legges derfor inn hvert

20. år. Det vil ikke være noen restverdi i dette tilfellet. I «Besparelse energi - dagens verdi» settes årlig energiforbruk for grunnsenario subtrahert med årlig energiforbruk for BergVP, før dette multipliseres med strøm- og fjernvarmeprisen. Dette vil være årlig energibesparelse. Videre settes det inn årlige vedlikeholdskostnader i rad «Kostnader drift - dagens verdi». Summen av nevnte verdier er vist i svartfarget rad. Videre legges det inn justerte verdier, hvor «investering - justert kontantstrøm» fra år 1 og «kostnader drift - justert kontantstrøm» inkluderer LPS, mens «besparelser energi - justert kontantstrøm» inkluderer prisutvikling på strøm. Nåverdi per år kan dermed beregnes ved å sette inn ligning 2 og 3, og dermed summeres for å finne akkumulert nåverdi.

KONTANTSTRØM - NÅVERDIANALYSE				
		1		An
INPUT:				
LPS kostnader/investeringer	2,50 %	1,025	1,051	1,077
Prisutvikling strøm	3,00 %	1,030	1,061	1,092
Avkastningskrav	4,00 %			
År	0	1	2	3
Investering dagens verdi	-1 717 000			
Besparelse energi - dagens verdi		119 016	119 016	119 016
Kostnader drift - dagens verdi		-27 015	-27 015	-27 015
Besparelse driftsutgifter - dagens verdi				
KONTANTSTRØM DAGENS VERDI	-1 717 000	92 001	92 001	92 001
Investering - justert kontantstrøm	-1 717 000	0	0	0
besparelser energi - justert kontantstrøm		122 587	126 264	130 000
Kostnader drift - justert kontantstrøm		-27 690	-28 383	-29 076
Restverdi				
KONTANTSTRØM JUSTERT FOR PRISUTVIKLING	-1 717 000	94 896	97 882	100 924
Nåverdi kontantstrøm pr år	-1 717 000	91 247	90 497	89 747
AKK NÅVERDI	1 289 178			
Benevnelse	0	1	2	3
	-1 717 000	1 625 753	1 532 266	1 445 000

Figur 5.4: Oppsett for grunnsenarioet og BergVP i LCC-beregningen.

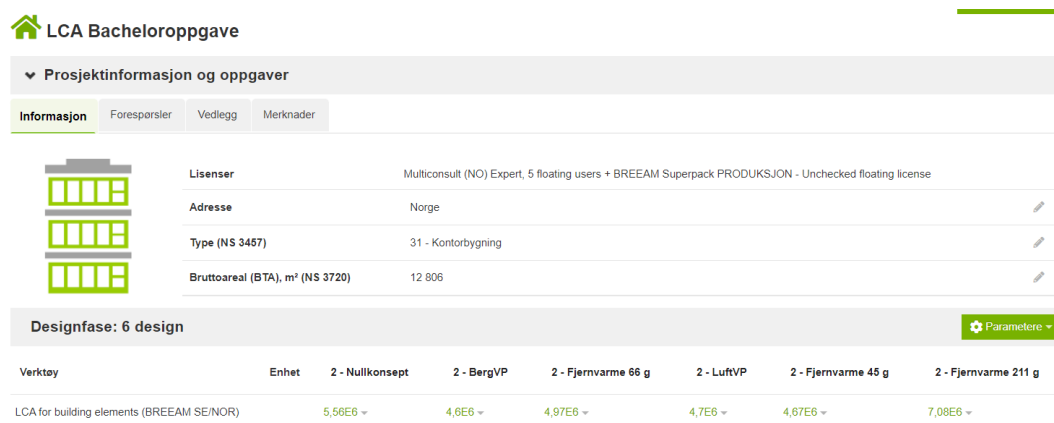
Fjernvarme og LuftVP settes opp på samme måte, med riktige investerings- og vedlikeholdskostnader. For Fjernvarme-alternativet byttes fjernvarmesentralen etter 50 år, og en utskiftingskostnad vil derfor settes inn på det 50. året. Dette medfører en restverdi på 40 års levetid som hensyntas i «Restverdi», ved å bruke ligning 1 med verdier som settes inn i år 50. Kjølemaskin har levetid på 20 år, og utskiftingskostnader for kjølemaskin settes inn hvert 20. år. For LuftVP byttes varmepumpe ut etter 15 år og elkjel etter 20 år. Utskiftingskostnader settes inn i henhold til dette.

Det settes også opp en graf som viser i hvilket år nåverdien for konseptene eventuelt vil bli positive.

5.6 LCA

For beregning av LCA trengs inndata for årlig energiforbruk fra hvert energikonsept, og levert energi. Dette hentes fra PyCESO, se kapittel 5.5 for verdier. I LCA-beregningene er det kun alternativene med lastprofil fra SIMIEN som benyttes.

Verktøyet som benyttes er «LCA for building elements (BREEAM SE/NOR)», med bygningstype «31 - kontorbygning». Bruttoarealet på $12\,806\text{ m}^2$ settes så inn. Videre settes det opp fire energikonsept som inkluderer BergVP, Fjernvarme og LuftVP, samt et konsept som kun benytter elektrisitet og panelovner. Det legges inn levetid på 60 år for alle alternativene, under «Calculation period» i kategorien «Building element materials». For panelovn-konseptet legges det inn «Electric radiator, per 1 kW/unit », med mengde på 315 kWh . Mengden tilsvarende maksimal oppvarmingsbehov. Videre legges det inn årlig energiforbruk, for panelovn-konseptet er dette på $686\,695\text{ kWh}$. Det letes frem en forbruksmiks som samstemmer med den ønskede forbruksmiksen, som i dette tilfellet vil være europeisk strømmiks på $130\text{ gCO}_2\text{e/kWh}$. Den valgte strømmiksen er kalt «Elektrisitet EU + Norge, forventet gjennomsnitt over 60 år». Denne strømmiksen benyttes også i BergVP og LuftVP, men mengden endres etter beregnet årlig energiforbruk for de ulike konseptene. Figur 5.5 viser oppsettet i One Click LCA.



Figur 5.5: Oppsett av scenarioene i One Click LCA.

For BergVP legges det inn vannbåren varme, elkjel og væske/vann-varmepumpe. Det velges «Heat distribution system (water heat distribution) for office and care buildings, per m2 GFA» med GWP for lokal kompensasjon på $10,81\text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$, med mengde på $12\,806\text{ m}^2$ og levetid på 30 år. Det vannbårne systemet benyttes i alle tre energikonseptene. Videre legges det inn «Electric boiler, per $1\text{ kW / unit - beta}$ » med GWP for lokal kompensasjon på $27,27\text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$, med mengde på 315 kWh og levetid på 20 år. Til slutt legges det inn «Electric heat pump (water-water), 20 kW », med GWP for lokal kompensasjon på $0,9\text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ og levetid 20 år. Det settes inn mengde på fem stykker for å dekke oppvarmingsbehovet på 95 kWh , som varmepumpen er dimensjonert for. Strømforbruksmengden settes til $534\,110\text{ kWh}$.

For Fjernvarme legges det inn «District heat distribution center, per 1 kW » med GWP på $9,23\text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$, med mengde på 315 kWh for dekke det maksimale oppvarmingsbeho-

vet og levetid på 50 år. Det var ikke mulig å finne en kjølemaskin i simuleringsverktøyet, og det legges derfor inn en luft/vann-varmepumpe som erstatning for å dekke kjølebehovet. Det ble valgt tretten stykker «Electric heat pump (air-water), 10 kW» med GWP på 1,6 $kgCO_2e/kg$ for å dekke det maksimale kjølebehovet på 130 kWh . Levetid settes til 20 år. Strømforbruksmengden settes til 462 906 kWh . For fjernvarme-alternativet må det også legges inn forbruksmiks. Det benyttes 2021-tall fra Statkraft Varme i Trondheim på 65,7 gCO_2/kWh , som er deres beregnede klimagassutslipp. Det legges inn «User-declared Norwegian district heat as $kg CO_2e$ » med GWP på 1,0 $kgCO_2e/kg$. Siden denne er oppgitt i 1,0 $kgCO_2e/kg$, og valgt verdi er 65,7 gCO_2/kWh , multipliseres oppvarmingsbehovet på 242 153 kWh med valgt verdi. Setter da inn mengde på 15 909,5 kg for forbruksmiks for fjernvarme.

I LuftVP benyttes det samme vannbårne systemet og elkjel som for BergVP. Det benyttes samme varmepumpe som benyttes i Fjernvarme, men det benyttes ti stykker for å dekke oppvarmingsbehovet på 95 kWh . Levetiden til varmepumpa settes til 15 år. Strømforbruksmengden settes til 545 385 kWh .

5.7 Følsomhetsanalyse

Det ble besluttet å gjøre en følsomhetsanalyse, hvor LCC skal varieres med spotpris og LCA med forbruksmiks. Endringer i spotprisen gjør det interessant å se på kostnadsendringene ved en variabel spotpris. Valgt spotpris benyttet i oppgaven til nå er basert på gjennomsnitt for spotpris i 2019, på 0,38 kr/kWh . Basert på antagelser fra NVE om økt spotpris i 2040 settes spotpris i følsomhetsanalysen til 0,5 kr/kWh . På grunn av vedvarende høye spotpriser i Norge vinteren 2021/2022, benyttes også spotpris på 2 kr/kWh for å kunne gjenspeile disse prisene. I analysen antas det at nettleie og avgifter holdes konstant på 0,4 kr/kWh . Inkludert nettleie og avgifter er da strømprisen på 0,9 kr/kWh og 2,4 kr/kWh . Basert på den usikre situasjonen i Europa, med klimaomstilling og krig, testes også en strømpris på 1,5 kr/kWh . Denne verdien ligger mellom den antatte verdien fra NVE og de høye prisene fra vintersesongen i Norge. Det antas at fjernvarmepriisen vil være lik strømprisen. Selve analysen gjøres ved å benytte samme oppsett som i LCC-regnearket.

Videre gjøres det en følsomhetsanalyse i One Click LCA ved å endre forbruksmiks. På grunn av kompleksiteten ved å anta fremtidige verdier for forbruksmiks for elektrisitet, er det kun forbruksmiks for fjernvarme som endres. Norge er så sterkt knyttet til det europeiske kraftmarkedet, at en enkel analyse for å se på fremtidig strømmiks ikke var ønskelig. Klimagassutslipp fra fjernvarme derimot, avhenger av lokale og regionale bestemmelser og produksjonsmetoder. Første forbruksmiks som settes inn er 45 gCO_2/kWh , dette er det antatte klimagassutslippet fra fjernvarme i Trondheim i 2040 beregnet av Statkraft Varme. Videre benyttes forbruksmiks på 211 gCO_2/kWh , som er verdien som benyttes av ZEB i klimagassberegninger. Det er kun mengden som må endres i One Click LCA fra tidligere beregninger. Mengde for scenarioet med 45 gCO_2/kWh vil være 10 897 kg , og 51 094 kg for scenarioet med 211 gCO_2/kWh . Dette er basert på oppvarmingsbehov multiplisert med valgt forbruksmiks. For å skille fjernvarme-alternativene i One Click LCA vil de få følgende navn basert på forbruksmiks; «Fjernvarme 66 g», «Fjernvarme 45 g» og «Fjernvarme 211 g».

6 Resultat

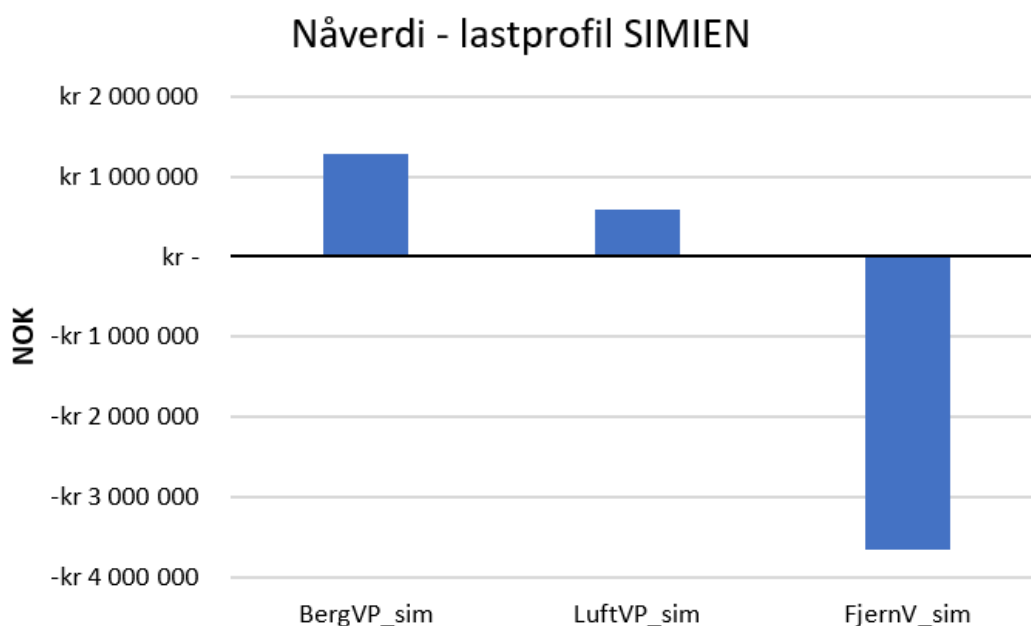
I dette kapitlet vil resultater fra simulering i PyCESO, LCC, LCA og følsomhetsanalyser fremkomme. Resultat for de genererte lastprofilene fra SIMIEN og PROFet er vist i tabell 5.2 i kapittel 5. Det årlige energiforbruket funnet ved simulering i PyCESO er vist i tabell 6.1.

Tabell 6.1: Årlig energiforbruk.

	Årlig energiforbruk [kWh]
Nullkonsept_sim	686 695
Nullkonsept_prof	2 198 827
BergVP_sim	534 110
BergVP_prof	1 886 796
LuftVP_sim	545 385
LuftVP_prof	1 908 285
Fjernvarme_sim	705 059
Fjernvarme_prof	2 237 920

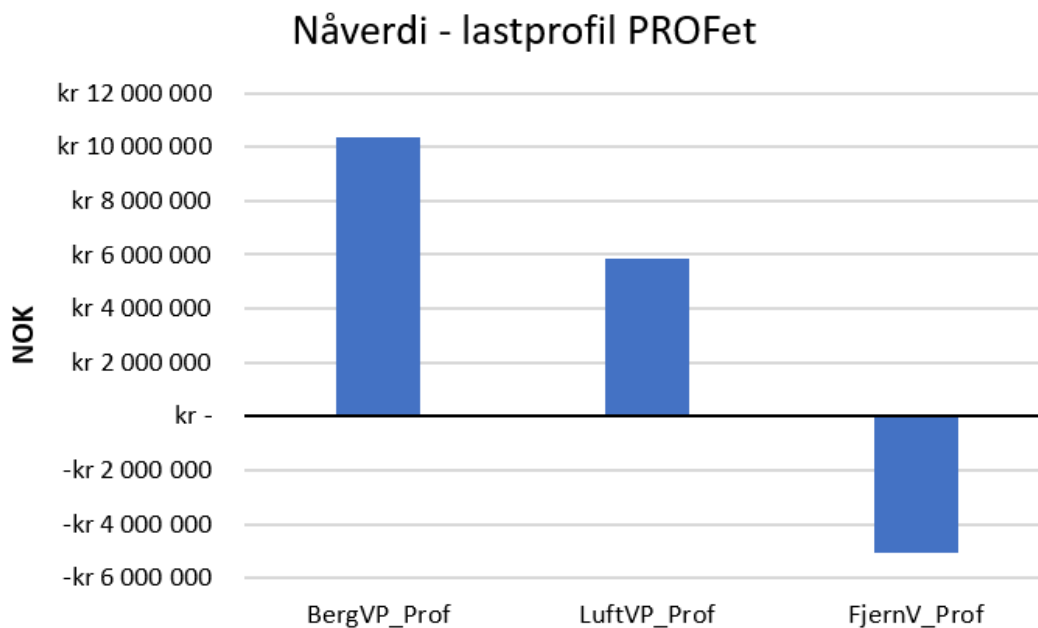
6.1 Resultat fra LCC

Nåverdiberegningene er basert på analyseperiode på 60 år, med diskonteringsrente på 4 %, LPS på 2,5 %, strøm- og fjernvarmepris på 0,78 *kr/kWh* og en årlig prisutvikling for energikostnader på 3 %. Figur 6.1 viser nåverdi for energikonseptene med lastprofil fra SIMIEN. BergVP og LuftVP har positiv nåverdi på 1 289 178 *kr* og 593 933 *kr*, og er dermed lønnsomme. Fjernvarme har negativ nåverdi på 3 642 681 *kr*.



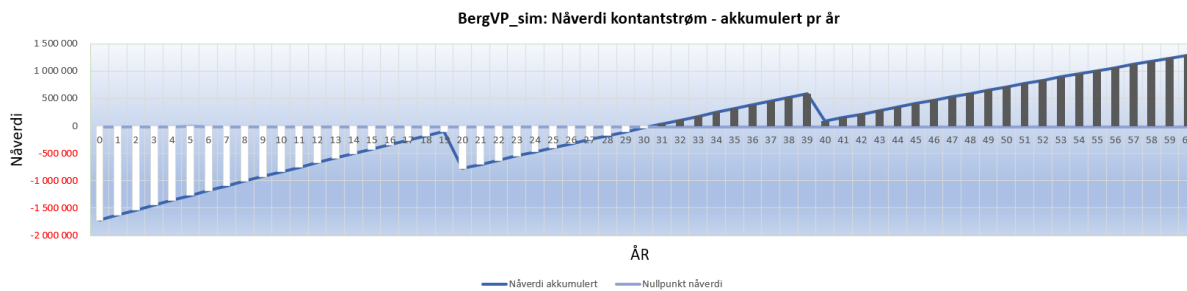
Figur 6.1: Nåverdi med lastprofil fra SIMIEN.

Figur 6.2 viser nåverdi for energikonseptene med lastprofil fra PROFet. Trenden er lik som for SIMIEN; BergVP og LuftVP har positiv nåverdi, mens Fjernvarme har negativ nåverdi. Disse er på henholdsvis 10 358 412 *kr*, 5 842 338 *kr* og 5 070 912 *kr*.



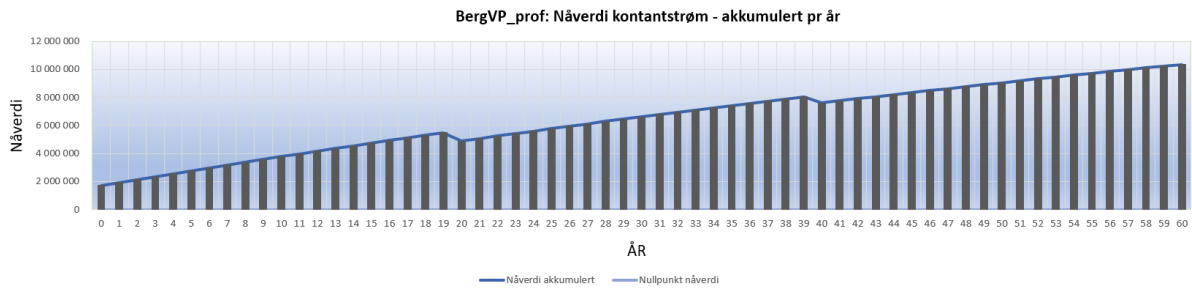
Figur 6.2: Nåverdi med lastprofil fra PROFet.

Graf som viser i hvilket år nåverdien for BergVP_sim går i null er vist i figur 6.3. Endring i graf varierer med utskiftingskostnadene som legges inn i år 20 og 40.



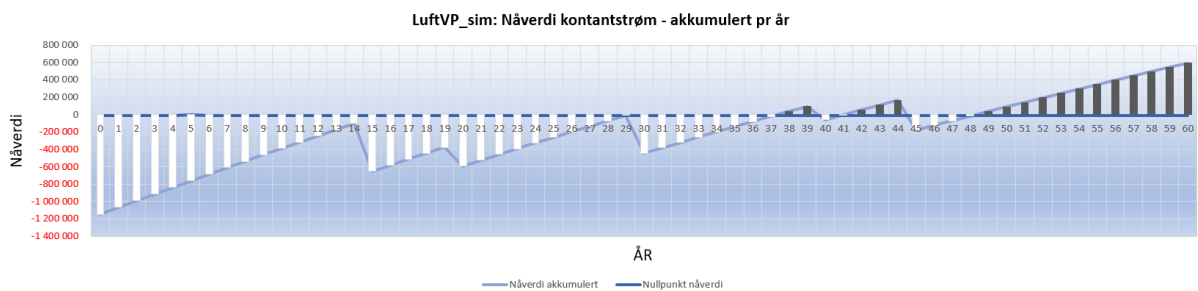
Figur 6.3: Nåverdi for BergVP_sim.

Figur 6.4 viser akkumulert nåverdi per år for BergVP med lastprofil fra Profet.



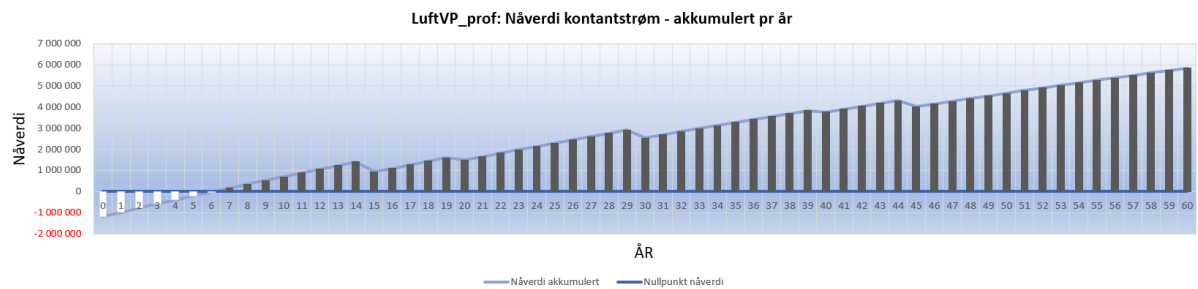
Figur 6.4: Nåverdi for BergVP_prof.

Graf for LuftVP_sim er vist i figur 6.5. I dette tilfellet vil nåverdien variere mellom positiv og negativ verdi fra år 37 til år 49.



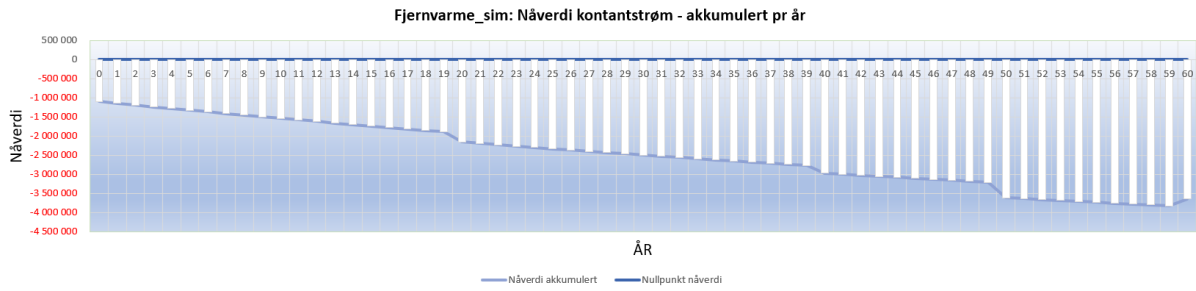
Figur 6.5: Nåverdi for LuftVP_sim.

Med lastprofil fra Profet er nåverdien for LuftVP negativ frem til år sju, deretter er den positiv resten av analyseperioden, se figur 6.6.



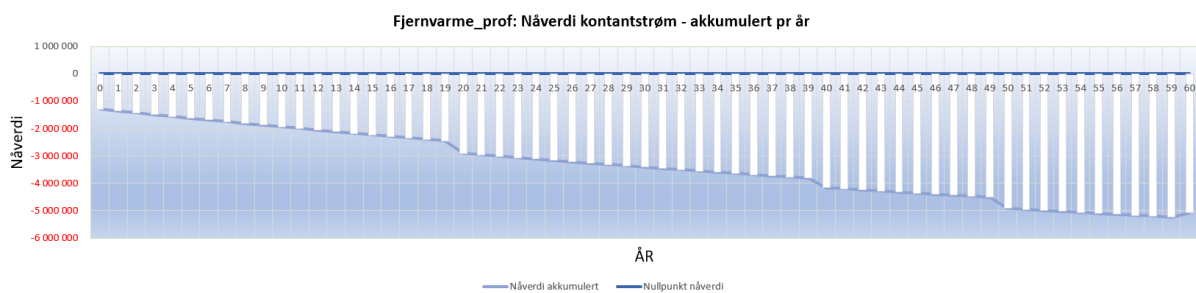
Figur 6.6: Nåverdi for LuftVP_prof.

For Fjernvarme_sim vil nåverdien forbli negativ i hele perioden, se figur 6.8.



Figur 6.7: Nåverdi for Fjernvarme_sim.

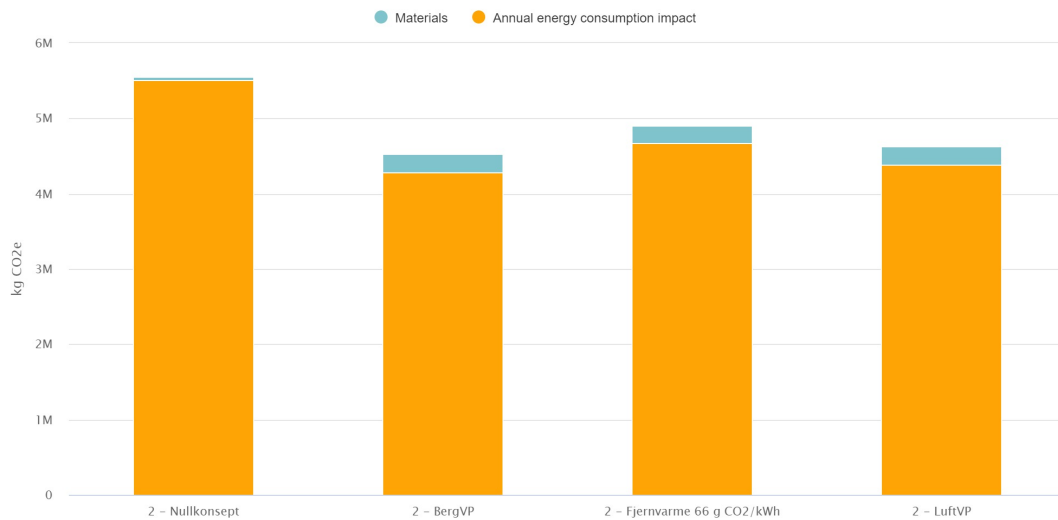
Akkumulert nåverdi per år for Fjernvarme vil også være negativ hele analyseperioden med lastprofil fra Profet.



Figur 6.8: Nåverdi for Fjernvarme_prof.

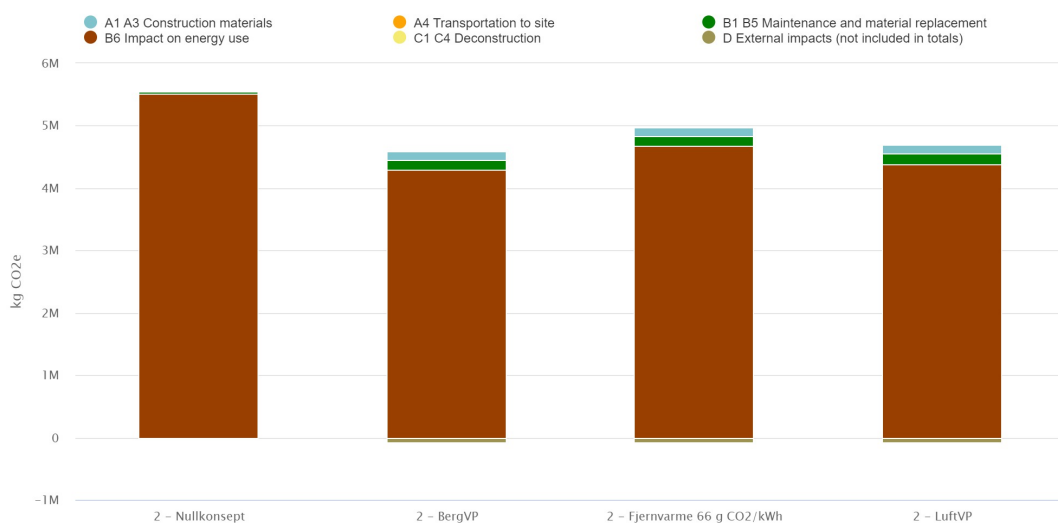
6.2 Resultat fra LCA

Etter å ha lagt inn verdiene i One Click LCA som beskrevet i kapittel 5, lages det en graf som viser beregnet CO_2 -utslipp fra de ulike energikonseptene sammenlignet med nullkonseptet. Grafen er delt inn i klimagassutslipp fra årlig energiforbruk og klimagassutslipp fra materialer. Se figur 6.9 for resultat av antall $kgCO_2e$ som er funnet for Nullkonsept, BergVP, Fjernvarme og LuftVP.



Figur 6.9: Klimagassutslipp for de valgte energikonseptene.

BergVP har det laveste klimagassutslippet med 4 289 696 $kgCO_2e$ fra årlig energiforbruk og 234 651 $kgCO_2e$ fra materialbruk. For Fjernvarme er utslippet noe høyere, med 4 672 392 $kgCO_2e$ fra årlig energiforbruk og 227 614 $kgCO_2e$ fra materialer. I LuftVP er det henholdsvis 4 380 251 $kgCO_2e$ og 245 904 $kgCO_2e$.



Figur 6.10: Klimagassutslipp fra hele livssyklusen.

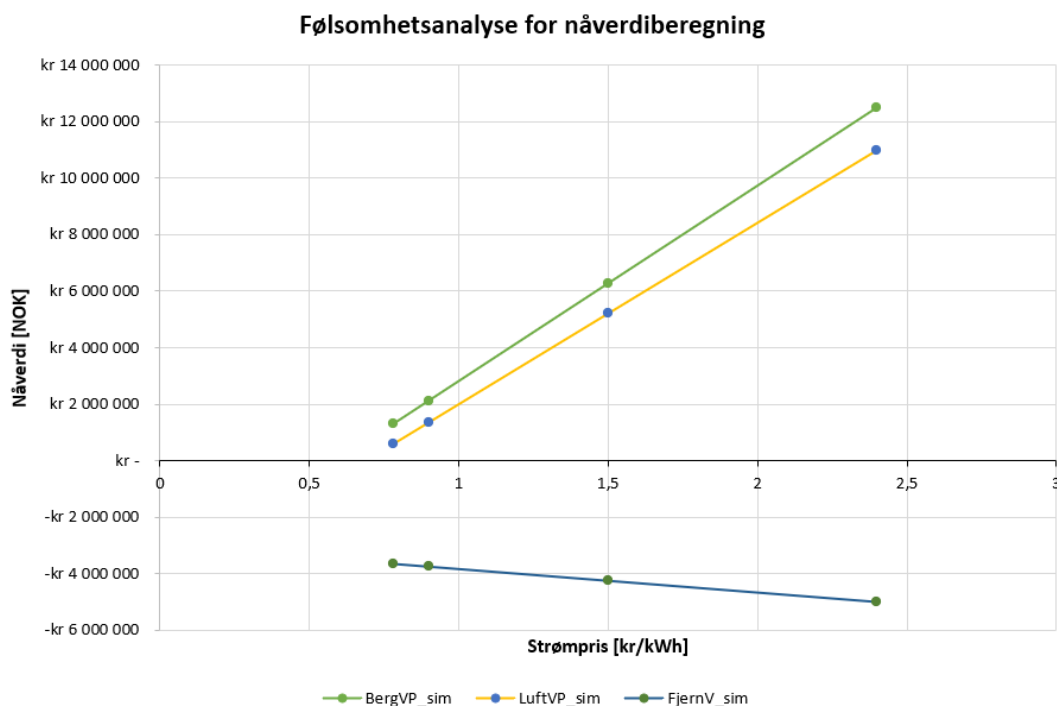
Videre kan One Click LCA fremstille utslipp fra hele livssyklusen til de ulike energikonseptene, dette fremkommer i figur 2.7. For Nullkonsept vil utslipp fra konstruksjonsmaterialer være på 27 416 $kgCO_2e$ og 5 515 180 $kgCO_2e$ for energiforbruk. For BergVP er disse verdiene på henholdsvis 148 472 $kgCO_2e$ og 4 289 696 $kgCO_2e$. I tillegg vil det være 158 482 $kgCO_2e$ fra vedlikehold og utskifting av komponenter. Fjernvarme har noe høyere utslipp fra energiforbruk, på 4 672 392 $kgCO_2e$. Vedlikehold og utskifting, samt konstruksjonsmaterialer, er på 153 303 $kgCO_2e$ og 147 337 $kgCO_2e$. For LuftVP er disse verdiene på 4 380 251 $kgCO_2e$, 169 409 $kgCO_2e$ og 151 640 $kgCO_2e$.

6.3 Resultat fra følsomhetsanalyse

Basert på fremgangsmåte i kapittel 5 vil det i dette kapittelet fremkomme resultater fra følsomhetsanalysen som gjøres med varierende spotpris i nåverdiberegningene, og varierende forbruksmiks for fjernvarme i klimagassberegningene.

6.3.1 Endring i spotpris

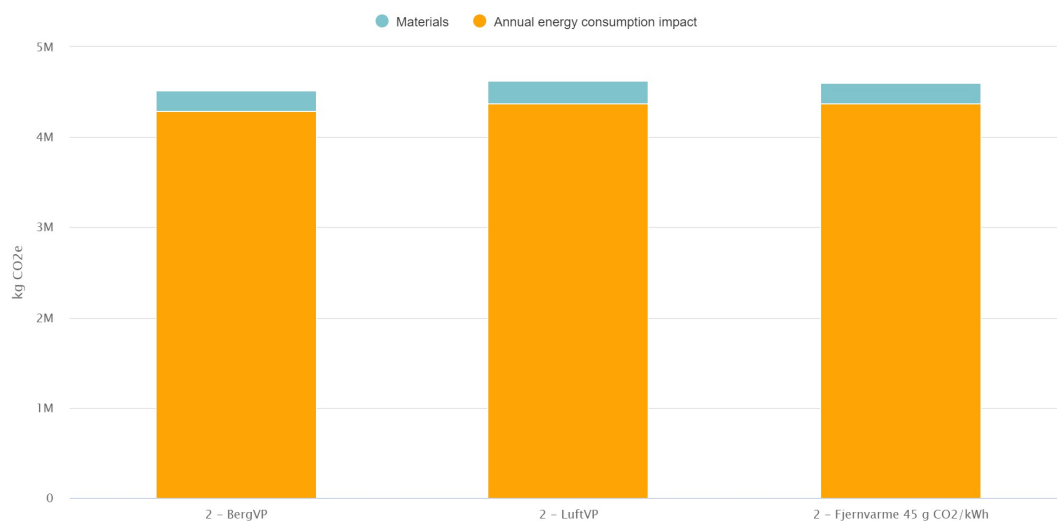
For følsomhetsanalyse av nåverdiberegningene endres spotpris fra 0,78 kr/kWh til 2,4 kr/kWh . Når strømprisen er satt til 2,4 kr/kWh er nåverdien 12 490 244 kr , 10 967 315 kr og -4 990 758 kr for henholdsvis BergVP_sim, LuftVP_sim og Fjernvarme_sim. Det antas at trenden i grafene vil være det samme for energikonseptene med lastprofil fra PROFet. Se figur 6.11 for graf som viser endring i nåverdi og strømpris for de tre energikonseptene. Trenden i grafen er lineær.



Figur 6.11: Følsomhetsanalyse med nåverdi og strømpris.

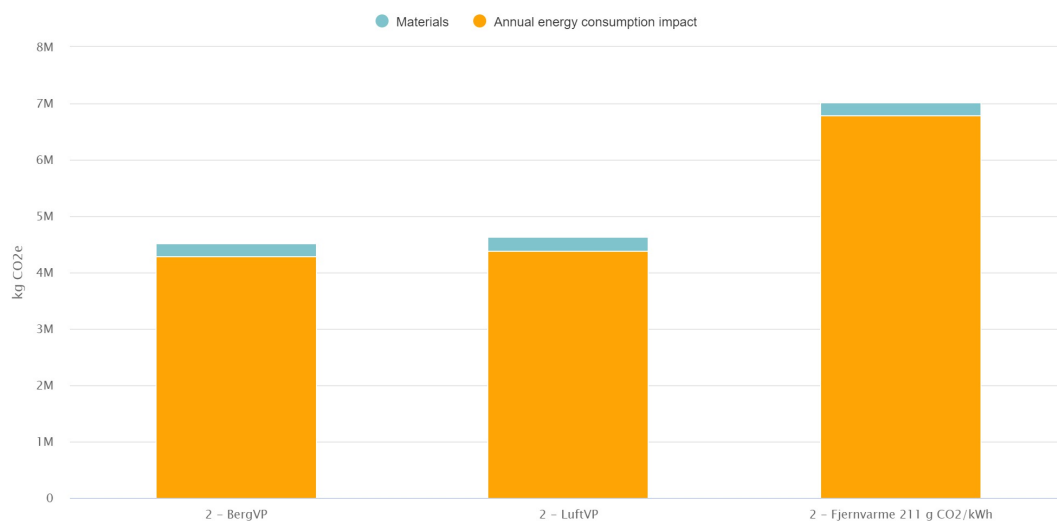
6.3.2 Endring av forbruksmiks for fjernvarme

I følsomhetsanalysen for endring av forbruksmiks for fjernvarme, vil resultatene for BergVP og LuftVP forbli konstante, mens utslipp fra årlig energiforbruk for Fjernvarme vil endres med varierende forbruksmiks. Figur 6.12 viser de tre energikonseptene med forbruksmiks for Fjernvarme på $45 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$. Lavere forbruksmiks medfører mindre forskjell i totalt CO_2 -utslipp mellom de ulike energikonseptene. Utslipp fra materialbruk forblir konstant, mens utslipp fra årlig energiforbruk for Fjernvarme blir på $4\,371\,642 \text{ kgCO}_2\text{e}$.



Figur 6.12: Følsomhetsanalyse med forbruksmiks på $45 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$.

Resultat for forbruksmiks for Fjernvarme på $211 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ er vist i figur 6.13. Høy forbruksmiks medfører høyt CO_2 -utslipp for Fjernvarme. Utslipp fra årlig energiforbruk vil bli på $6\,783\,462 \text{ kgCO}_2\text{e}$.



Figur 6.13: Følsomhetsanalyse med forbruksmiks på $211 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$.

7 Diskusjon

Resultatene fra simuleringer og beregninger i kapittel 5 og 6 vil i dette kapitlet sammenlignes og diskuteres. De viktigste resultatene er vist i tabell 5.3 i kapittel 5 og i tabell 7.1. Videre tas det med ulike faktorer som kan ha påvirket resultatene ut ifra de forutsetningene som er tatt, og de begrensningene som er gjort i denne oppgaven.

Tabell 7.1: Resultat for de tre energikonseptene.

	BergVP	LuftVP	Fjernvarme
Årlig energiforbruk_sim [kWh]	534 110	545 385	705 059
Årlig energiforbruk_prof [kWh]	1 886 796	1 908 285	2 237 920
Nåverdi_sim [NOK]	1 289 178	593 933	- 3 642 681
Nåverdi_prof [NOK]	10 358 412	5 843 338	- 5 070 912
Klimagass-utslipp [kgCO ₂ e]	4 524 347	4 626 155	4 900 006
Nåverdi_sim 2,4kr [NOK]	12 490 244	10 967 315	- 4 990 758
Klimagass-utslipp (45 gCO ₂ e/kWh)	-	-	4 599 256
Klimagass-utslipp (211 gCO ₂ e/kWh)	-	-	7 011 076

Formålet med oppgaven er å svare på problemstillingen om hvordan inndata for forbruksprofil og følsomhet best kan genereres. Det er også interessant å se på hvordan lønnsomhet og klimapåvirkning for energikonseptene varierer med valgte faktorer, slik som spotpris og forbruksmiks. I lys av den spente situasjonen i Europa, og klimamålene for byggebransjen, er det viktig og nødvendig å velge gode løsninger som ikke påvirkes i for stor grad av variable faktorer.

7.1 Simulering av lastprofiler

Resultatene for lastprofil fra simulering i SIMIEN og PROFet viste store forskjeller. Generelt var verdiene hentet fra PROFet dobbelt så store som verdiene fra SIMIEN. En av de største forskjellene når det skal simuleres i de to ulike programmene, er antallet inndata som må legges inn for å få resultat. I SIMIEN legges det inn konkrete data for det spesifikke bygget. I PROFet legges det kun inn klimadata og bruttoareal for bygget.

På denne måten er PROFet et enklere verktøy å benytte, både ved at færre inndata må bestemmes og at simuleringen tar kortere tid.

En annen forskjell ved bruk av PROFet sammenlignet med SIMIEN, er at kjølebehov og elektriske effekt er lagt i samme lastprofil. Dette betyr at dersom kjølebehovet trengs i egen lastprofil, slik som i denne oppgaven, må denne beregningen gjøres isolert. Dette medfører store usikkerheter hvorvidt denne beregningen gir riktig kjølebehov.

Rapporten av K.B. Lindberg, S.J. Bakker og I. Sartori som ligger til grunn i simuleringssverktøyet PROFet, beskriver noen av feilkildene som kan ha påvirket resultatet. Verktøyet er i hovedsak laget for å kunne simulere lastprofil for et større område, slik som by eller bydel. Dette betyr at det er gjort antagelser i beregningsgrunnlaget som påvirker resultat når det kun er snakk om ett bygg. Blant annet vil solinnstråling og vind påvirke ett enkelt bygg i større grad enn for mange bygg i en bydel. I tillegg er det kun to kontorbygg i kategorien «very efficient», som gjør at erfaringsdataene er begrenset. For selve lastprofilene er det antatt at kontorbygg vil ha en IT-server i bygget, og dette er lagt inn i lastprofil for elektrisk effekt. Det samme er antagelsen om at det i hovedsak benyttes kjølemaskin i kontorbygg, som også påvirker lastprofilen for elektrisk effekt. Følsomhetsanalysen som

ble gjennomført viste kun små forskjeller når lekkasjetall og ventilasjon ble endret. Det antas at byggets bruk, blant annet avhengig av antall personer og ønsket komfort, vil ha en større innvirkning på lastprofilene. Siden PROFets datagrunnlag er basert på reelle bygg, er det vanskelig å si noe om hvorvidt byggene benyttes slik de er tiltenkt. Hvor mange personer bruker bygget, er det flere eller færre enn antatt? Endres temperatur for romoppvarming og -kjøling mer enn nødvendig? Driftes bygget riktig?

Et ønsket alternativ for å kunne sammenligne lastprofilene ville vært å se på reelle verdier fra ALO. Dette ville gitt et bedre bilde av hvilke lastprofiler som stemmer med faktiske verdier fra bygget. Selv om SIMIEN er det mest benyttede simuleringssverktøyet for energibruk i bygg i en prosjekteringsfase, antas det at disse resultatene likevel ikke nødvendigvis stemmer overens med virkeligheten.

7.2 BergVP med lastprofil fra SIMIEN

Fra resultatene kommer BergVP med lastprofil fra SIMIEN best ut både med tanke på årlig energiforbruk og nåverdi. Generelt har bergvarmepumper bedre COP enn væske/vannvarmepumper som benytter luft, og det er også forutsetningen i denne oppgaven. Nåverdien for BergVP er dobbelt så stor sammenlignet med LuftVP, og er positiv allerede etter 30 år. Selv om investeringskostnadene for BergVP er høy, har teknologiene lang levetid og lave utskiftingskostnader, som gjør dette konseptet lønnsomt.

I følsomhetsanalysen for nåverdiberegning kommer det tydelig frem at høyere strømpris vil medføre høyere nåverdi. Dette betyr at dersom strømprisen øker i fremtiden, slik som det er antatt fra NVE og fra fremtidsutsiktene til det europeiske kraftmarkedet, vil alternativet med BergVP være lønnsomt. Med en økning i spotpris fra 0,78 til 2,4 kr/kWh vil nåverdien være nesten ti ganger større.

Generelt er klimagassutslippene for de tre alternativene med lastprofil fra SIMIEN i samme størrelsesorden, med liten forskjell mellom BergVP og LuftVP. I hovedsak styres CO_2 -utslippet av energibehovet, og ikke av utslipp fra materialer.

7.3 BergVP med lastprofil fra PROFet

Nåverdiberegningen for BergVP med lastprofil fra PROFet ender med en nåverdi på 10 358 412 *kr*. Det vil si at denne løsningen er mer lønnsom enn BergVP_sim, men her er det i tillegg et mye høyere årlig energiforbruk som ikke tydeliggjøres i nåverdiberegningen.

Det årlige energiforbruket er med på å styre nåverdien, ved at det legges til grunn en energibesparelse mellom Nullkonsept og aktuelt energikonsept. Denne besparelsen vil øke i takt med økte strømpriser.

7.4 LuftVP med lastprofil fra SIMIEN

Det nest mest lønnsomme energikonseptet er LuftVP. I årlig energiforbruk er det ikke stor forskjell mellom dette alternativet og BergVP, men LuftVP har et forbruk som er 10 000 *kWh* høyere. Nåverdien er en del mindre, men likevel positiv, og dermed et lønnsomt alternativ. Nåverdien nærmer seg null allerede i år 14, men forblir negativ da utskiftingskostnad for varmepumpen tilføres i år 15. Videre varierer nåverdien mellom positiv og negativ verdi, avhengig av besparelser og utskiftingskostnadene som forekommer oftere i dette alternativet enn for BergVP. Fra år 49 er nåverdien positiv resten av analyseperioden. Dette betyr at for analyseperiode mindre enn 60 år, kunne resultatet av lønnsomheten vært annerledes. Klimagassutslippene er relativt like som for BergVP, kun 100 000 *kgCO_{2e}* høyere.

Med strømpris på 2,4 *kr/kWh* er lønnsomheten til LuftVP 18 ganger så stor som med strømpris på 0,78 *kr/kWh*. Dette betyr at også i dette tilfellet vil økt strømpris gjøre alternativet mer lønnsomt. Likevel er dette alternativet mindre lønnsomt enn BergVP.

7.5 LuftVP med lastprofil fra PROFet

LuftVP med lastprofil fra PROFet har en nåverdi på 5 842 338 *kr*. Nåverdien er negativ frem til år sju, før den blir positiv. Dette alternativet er ikke like lønnsomt som BergVP_prof, som har dobbelt så stor nåverdi.

Det antas at endring av strømpris vil påvirke konseptene på samme måte som for LuftVP_sim, ved at økt strømpris vil gi økt nåverdi.

7.6 Fjernvarme med lastprofil fra SIMIEN

Fjernvarme er den dårligste løsningen blant de tre alternativene med lastprofil fra SIMIEN, både med tanke på årlig energiforbruk, lønnsomhet og klimagassutslipp. Fjernvarme har et årlig energiforbruk som er omtrent 150 000 *kWh* høyere enn for BergVP og LuftVP. I nåverdiberegningene viser resultatet for Fjernvarme at nåverdien vil være negativ i hele

analyseperioden, med synkende verdi. Selv om investeringskostnaden for fjernvarmeanlegget og kjølemaskinen er lavere enn for BergVP og LuftVP, er vedlikeholdskostnaden noe høyere. I tillegg er energikostnaden basert på årlig energiforbruk, som i dette alternativet er høyt, og vil derfor påvirke nåverdien negativt.

Med økt strømpris er det likevel ikke like stor forskjell i nåverdien for Fjernvarme som det var for BergVP og LuftVP, men den synker med omtrent 1 000 000 NOK fra 0,78 kr/kWh til 2,4 kr/kWh i strømpris. Basert på trenden i grafen kan det se ut som at svært lave strømpriser må til for at energikonseptene med lastprofil fra PROFet skal bli lønnsomme, dette er en svært usannsynlig kraftmarkedsutvikling.

For forbruksmiks for fjernvarme på 65,7 gCO_2e/kWh var utslippet for Fjernvarme rundt 300 000 $kgCO_2e$ høyere enn for de andre alternativene. I dette alternativet ble det også benyttet to ulike forbruksmikser for fjernvarme for å kunne se på hvordan dette påvirket resultatet. Med forbruksmiks på 45 gCO_2e/kWh ble utslippet fra Fjernvarme relativt likt som BergVP, og litt mindre enn LuftVP. Altså vil en lavere verdi for forbruksmiks gi et bedre resultat for klimagassberegningene. Videre ga forbruksmiks på 211 gCO_2e/kWh et mye høyere klimagassutslipp, nesten 2,5 millioner $kgCO_2e$ mer enn for BergVP og LuftVP.

Et interessant tema når det gjelder forbruksmiks for fjernvarme, er den store forskjellen mellom tallene som presenteres av Statkraft Varme for Trondheim og ZEB. Statkraft Varme ekskluderer blant annet spillvarme fra avfall i sine beregninger, som kan medføre at deres verdier er lavere enn de ZEB benytter seg av i sine klimagassberegninger. Det er derfor knyttet usikkerhet til bruk av disse verdiene, og hvilke av de som er mest relevant å benytte seg av.

Siden Trondheim Kommune kan benytte seg av tilknytningsplikt til fjernvarmenettet for nybygg, kan det oppstå situasjoner der fjernvarme må benyttes selv om dette ikke nødvendigvis er det mest lønnsomme alternativet.

7.7 Fjernvarme med lastprofil fra PROFet

I Fjernvarme-alternativet er nåverdien negativ, med verdi på 5 070 912 kr . Trenden i grafen er relativt lik for begge, med negativ nåverdi i alle år. Det antas at også her er det årlige energiforbruket så mye høyere enn Nullkonsept at det er avgjørende for nåverdiens negative verdi.

Dersom det ble tatt utgangspunkt i å benytte lastprofil fra PROFet i et reelt prosjekt, ville to av de tre energikonseptene være svært lønnsomme. Dette betyr at det oppstår en mulighet for å velge energikonsept på feil grunnlag. Sammenlignet med lastprofil fra SIMIEN er det store forskjeller i årlig energiforbruk, og det er viktig å velge energikonsept som har lavt energiforbruk. Et tredje alternativ bør dermed vurderes, for å kunne sammenligne troverdigheten til de to simuleringsverktøyene. Uavhengig av lastprofil er BergVP den beste løsning, men det er nødvendig å velge et konsept med lavt energiforbruk og som har en realistisk nåverdi.

Siden beregningene i PyCESO tilsa at solceller ikke er lønnsomt med strømpris fra 2019, men med høyere strømpriser fra 2021, vil det være naturlig å se på muligheten for å benytte seg av solceller dersom det antas at spotprisen kun vil øke i fremtiden. Installering av solceller vil gjøre bygg mindre avhengig av kjøpt energi, og dermed ikke like utsatt for endring i spotpris.

7.8 Faktorer som påvirker resultatene

Det er mange faktorer som påvirker resultatene som fremkommer i oppgaven. Det er kun gjort følsomhetsanalyse på spotpris og forbruksmiks, men det ville vært relevant å se på virkningen av valgt verdi for COP for varmepumpene, og hvordan dette påvirker lønnsomheten. Basert på erfaring innad, ble det antatt at det i hovedsak er spotpris som avgjør hvorvidt et tiltak er lønnsomt eller ikke.

Endring i kraftmarkedet vil avgjøre om energikonseptene er lønnsomme over tid, og det ble derfor gjort følsomhetsanalyse på spotpris og forbruksmiks for fjernvarme. Selv om det antas at gjennomsnittlig spotpris vil øke de neste tiårene, vil det forekomme perioder hvor strømprisen er lavere enn forespeilet her. Selv om Norge er tett knyttet opp til det europeiske kraftmarkedet, vil kraftprisen likevel være væravhengig. Siden kraftproduksjonen i Norge i hovedsak består av vannkraft, vil nedbør spille en stor rolle for hvordan prisene utvikler seg her hjemme.

Videre er det flere variabler som kan påvirke lønnsomhetsberegningene. Basert på erfaringstall ble kalkulasjonsrenten, LPS og årlig prosentvis prisutvikling for energikostnad bestemt. Kalkulasjonsrenten ble satt til fire prosent, men for statlige tiltak ville den vært satt til tre prosent for en analyseperiode på 60 år, basert på gjeldende regler. For LPS ble den prosentvise stigningen satt til 2,5. Til sammenligning var lønnsøkningen i 2020-2021 på 5,8 %. Dette tallet er dobbelt så stort som benyttet i oppgaven, men LPS i oppgaven skal vise til en sannsynlig årlig lønnsøkning de neste 60 årene. Årlig prosentvis prisutvikling for energikostnad ble satt til tre prosent, basert på tall som har vært brukt i tidligere lønnsomhetsberegninger hos Multiconsult. Det er ikke diskutert hvorvidt denne er riktig eller feil, men det er grunn til å anta at grunnet økte strømpriser, en urolig politisk situasjon mellom EU og Russland, samt ettervirkninger av Covid-19, vil dette tallet kunne øke.

Et viktig aspekt ved klimagassberegningen er at det ikke ble gjort følsomhetsanalyse på forbruksmiks for elektrisitet. Siden klimagassutslippet i hovedsak styres av energibehovet, vil valgt strømmiks avgjøre størrelsen på CO_2 -utslippet for ulike energikonsept. Valgt strømmiks var på $130 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$, som legges til grunn i BREEAM. En ren norsk forbruksmiks på $18 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$ tilsvarer at mesteparten av strømmen kommer fra fornybare energikilder. Basert på resultatene for forbruksmiks for fjernvarme, ville et så lavt tall gitt mye lavere klimagassutslipp. Dette er en forenklet bilde av virkeligheten, og vil ikke være mulig å spore siden Norge er så tett koblet opp med det europeiske kraftsystemet.

8 Feilkilder

I lønnsomhetsberegningene oppstår det store usikkerheter ved å anta kalkulasjonsrente, prosentvis årlig prisutvikling for energikostnad og LPS. Det er også benyttet en blanding av erfaringstall fra Multiconsult og verdier funnet ved litteratursøk. Siden dette ikke er et aktuelt prosjekt er investeringskostnadene delvis basert på tall fra NVE, og på tall fra tidligere prosjekt. Vedlikeholdskostnadene ble funnet til å være tre prosent av investeringskostnadene, og vil ikke nødvendigvis stemme med reelle verdier for lignende prosjekt.

I tillegg ble et ferdiglagd Excel-arket for lønnsomhetsberegninger benyttet. Disse beregningene er omfattende, og tar for seg verdier som er brukt i flere celler. Det samme gjelder for Excel-arkene som ble utfylt for inndata til PyCESO. Det tas derfor høyde for at det kan ha oppstått feil underveis i prosessen.

Siden lastprofil for kjølebehov fra Profet måtte hentes ut fra lastprofil for elektrisk last ved å anta en normalverdi, antas det at disse verdiene ikke er helt riktige. Likevel stemmer det greit med de andre verdiene fra Profet, som også er det dobbelte av verdiene fra SIMIEN.

En svakhet ved å ikke ha mulighet til å sammenligne de to svært ulike lastprofilene med et tredje alternativ, er muligheten for å ha valgt feil lastprofil til videre beregninger. Profet ble utelukket fra videre beregninger basert på en rekke faktorer, men det er ikke bevist at SIMIEN kan forespeile gode nok lastprofiler som stemmer med reelle verdier.

9 Videre arbeid

På grunn av omfang og tidsbegrensning for oppgaven ble flere energikonsept for kontorbygget utelatt fra oppgaven. De valgte konseptene er vanlige å benytte i kontorbygg, men er ikke nødvendigvis mest aktuell for alle kontorbygg i Norge. Det hadde derfor vært interessant å simulere og beregne på flere energikonsept i et eventuelt videre arbeid.

Siden de to valgte simuleringsverktøyene for lastprofiler ga svært ulike resultat, hadde det vært ønskelig å kunne sammenligne disse verdiene med et tredje alternativ. I hovedsak ville reelle verdier fra bygget vært det beste alternativet, slik at det kan gjøres en sammenligning av simuleringsverktøyene opp mot reelle verdier.

Selv om PROFet ble utelukket i denne oppgaven, ville det vært interessant å vurdere bruk av verktøyet på andre bygningskategorier. Databasen til verktøyet inneholder ti andre bygningskategorier, med en større mengde bygg som er analysert i hver kategori. Det ville derfor vært relevant å sammenligne lastprofiler fra PROFet med lastprofiler fra SIMIEN i et prosjekt der databasen til bygningskategorien i PROFet har et bedre datagrunnlag.

10 Konklusjon

Siden bygg utgjør 40 % av det totale energiforbruket i Norge, er det viktig å sikre effektiv energibruk. Både for å nå de satte klimamålene, og for å forhindre utbygging av unødvendig kraftproduksjon. Et viktig virkemiddel for å sikre effektiv energibruk, er å benytte realistiske simuleringsverktøy i et prosjekteringsstadie for nybygg.

Energikonseptene som benyttet lastprofil fra PROFet ble svært lønnsomme, selv om det årlige energiforbruket var høyt. Dette kommer i hovedsak av at det årlige energiforbruket for energikonseptene var mye lavere enn for Nullkonseptet, og besparelsene ble derfor store. De simulerte lastprofilene fra SIMIEN og PROFet viste store forskjeller. Basert på resultatene ser det ut til at PROFet ikke bør benyttes for ett enkelt kontorbygg med passivhusstandard, på grunn av det smale datagrunnlaget som legges til grunn i verktøyet.

Med økt strømpris vil konseptene med allerede positiv nåverdi forbli lønnsomme, mens energikonseptet med negativ nåverdi vil forbli ulønnsom. Fremtidsutsiktene for kraftmarkedet tilsier at strømprisen vil øke, og dermed er det kun BergVP og LuftVP som vil være lønnsomme fremover i tid. Valg av forbruksmiks for fjernvarme påvirker resultatene for klimagassutslipp i stor grad, og kan være avgjørende for hvorvidt fjernvarme-alternativ bør vurderes i prosjekt med tanke på miljøpåvirkning.

Resultatene viser at lastprofil, varierende strømpris og forbruksmiks vil påvirke resultatene i stor grad, og korrekt valg av inndata er derfor viktig for å få et helhetlig bilde av lønnsomheten og miljøpåvirkningen for et valgt konsept.

Referanser

- [1] SNL. Solceller. <https://snl.no/solceller>, 28.04.2022, Hentet 25.03.2022.
- [2] ENOVA. Vannbåren varme. <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/vannbaren-varme/>, 27.12.2016, Hentet 27.03.2022.
- [3] Karoliussen, H. Varmepumper. *Forelesningsnotat*, 30. januar 2018.
- [4] SNL. Fjernvarme. <https://snl.no/fjernvarme>, 26.01.2021, Hentet 24.03.2022.
- [5] Standard Norge. Livssyklus kostnader for byggverk - prinsipper og kvalifikasjon. *NS 3454:2013*, 2013:5-7, Hentet 24.03.2022.
- [6] NVE. Langsiktig kraftmarkedsanalyse 2021-2040. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2021/rapport2021_29.pdf, 2021.
- [7] LCA.no AS. Hva er LCA? <https://lca.no/hva-er-lca/>, Hentet 22.03.2022.
- [8] Direktoratet for byggkvalitet. § 14-3. Minimumskrav til energieffektivitet. <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-3/>, Hentet 21.03.2022.
- [9] FN-sambandet. Parisavtalen. <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen>, 22.12.2020, Hentet 24.03.2022.
- [10] NVE. Energieffektivisering. <https://www.nve.no/energi/energisystem/energibruk-effektivisering-og-teknologier/energieffektivisering/>, 22.02.2022, Hentet 22.03.2022.
- [11] Energifakta Norge. Bærekraftige bygg. <https://energifaktanorge.no/et-baerekraftig-og-sikkert-energisystem/baerekraftige-bygg/>, 03.01.2019, Hentet 24.03.2022.
- [12] K. B. Lindberg, S.J. Bakker, and I. Sartori. Modelling electric and heat load profiles of non-residential buildings for use in long-term aggregated load forecasts. 2019.
- [13] Direktoratet for byggkvalitet. Byggteknisk forskrift med veiledning. <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/>, Hentet 21.03.2022.
- [14] Direktoratet for byggkvalitet. § 14-2. Krav til energieffektivitet. <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-2/>, Hentet 21.03.2022.
- [15] Grønn Byggallianse. Bidra til å få økt fokus på bærekraft i tek-20. <https://byggalliansen.no/event/articles-tek-20innspill/>, Hentet 24.03.2022.

- [16] Grønn jobb. Bli miljøfyrtårn - både lønnsomt og bærekraftig. Hentet 24.03.2021.
- [17] Grønn Byggallianse. Nysgjerrig på BREEAM-NOR? <https://byggalliansen.no/sertifisering/om-breeam/nysgjerrig-pa-breeam-nor/>, Hentet 21.03.2022.
- [18] SINTEF Byggforsk. Energibruk i bygninger. *Prosjektrapport 76*, page 95, 2011.
- [19] Energimerking.no. Karakterskalaen. <https://www.energimerking.no/no/energimerking-bygg/om-energimerkesystemet-og-regelverket/karakterskalaen/>, 13.10.2009, Hentet 24.03.2022.
- [20] Standard Norge. SN-NSPEK 3031:2021 . *Bygninger energiytelse - Beregning av energibehov og energiforsyning*, 03.12.2021.
- [21] NTE. Solcellepanel er lønnsomt! <https://nte.no/blogg/solcellepanel-er-lonnsomt/>, 14.08.2020, Hentet 25.03.2022.
- [22] B.E.A. Solenergi og solceller på tak. <https://www.b-e-a.no/aktuelt/solenergi-og-solpaneler-p%C3%A5-tak/>, 15.10.2019, Hentet 25.03.2022.
- [23] NOVAP. Slik virker en varmepumpe. <https://www.varmepumpeinfo.no/verdt-a-vite-om-varmepumper/slik-virker-en-varmepumpe>, 12.10.2018, Hentet 25.03.2022.
- [24] energismart. Bergvarmepumpe. <https://www.energismart.no/oppvarming/bergvarmepumpe-article246-821.html>, 24.01.2021, Hentet 24.03.2022.
- [25] Nordnorsk Brønnboring AS. Energibrønn privat. <https://nbb.no/energibronn-privat/>, Hentet 05.05.2022.
- [26] NVE. Kostnader i kraftsektoren. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_02a.pdf, page 139, 2015.
- [27] ENOVA. Luft-til-vann varmepumpe. <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/luft-til-vann-varmepumpe/>, 01.04.2022, Hentet 27.03.2022.
- [28] NIBE. NIBE Split Luft/vann-varmepumpe. <https://www.nibe.no/assets/documents/9620/M10750-1.pdf>, page 12, Hentet 07.04.2022.
- [29] energismart. Luft-vann varmepumpe. <https://www.energismart.no/oppvarming/luft-vann-varmepumpe-article212-821.html>, 10.08.2016, Hentet 27.03.2022.

- [30] SNL. Statkraft Varme AS. https://snl.no/Statkraft_Varme_AS, 26.09.2018, Hentet 24.03.2022.
- [31] SNL. Elektrokjel. <https://snl.no/elektrokjel>, 04.09.2019, Hentet 25.03.2022.
- [32] Norsk Energi. Elektrokjeler. <https://energi.no/elektrokjeler>, Hentet 24.03.2022.
- [33] Statkraft AS. Kjølning av boliger og bygg med fjernvarme. <https://www.statkraftvarme.no/produkter-og-tjenester/kjoling-av-bygg/>, Hentet 24.03.2022.
- [34] NVE. Langsiktig kraftmarkedsanalyse 2020-2040. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2020/rapport2020_37.pdf, 2020.
- [35] NVE. Kraftsituasjonen veke 12, 2022. <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/rapporter-kraftsituasjonen/kraftsituasjonen-veke-12-2022/>, Hentet 27.03.2022.
- [36] Gert Ove Mollestad. Nve-sjefen advarer om høye kraftpriser i lang tid. <https://www.montelnews.com/no/news/1310378/nve-sjefen-advarer-om-hye-kraftpriser-i-lang-tid>, Hentet 01.04.2022.
- [37] Tensio. Nettleie, priser og avtaler. <https://ts.tensio.no/kunde/nettleie-priser-og-avtaler>, Hentet 27.04.2022.
- [38] Nord Pool. Market data. <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/data-downloads/recalculated-nordic-system-price/>, Hentet 30.04.2022.
- [39] NVE. Kostnader i kraftsektoren. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_02a.pdf, page 231, 2015.
- [40] Det kongelige finansdepartement. Rundskriv R - Prinsipper og krav ved utarbeidelse av samfunnsøkonomiske analyser. https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/fin/vedlegg/okstyring/rundskriv/faste/r_109_2021.pdf, pages 5–6, 25.06.2021.
- [41] SSB. Lønnsveksten har tatt seg opp. <https://www.ssb.no/arbeid-og-lonn/lonn-og-arbeidskraftkostnader/statistikk/lonn/artikler/lonnsveksten-har-tatt-seg-opp>, Hentet 30.04.2022.
- [42] LCA.no AS. Miljøpåvirkninger. <https://lca.no/miljopavirkninger/>, Hentet 22.03.2022.

- [43] NVE. Strømforbruk i norge har lavt klimagassutslipp.
<https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/stromforbruk-i-norge-har-lavt-klimagassutslipp/>, 23.02.2021, Hentet 03.05.2022.
- [44] Standard Norge. NS 3720:2018 Metode for klimagassberegninger for bygninger. 01.09.2018, Hentet 04.05.2022.
- [45] SINTEF Byggforsk. 473.020 Nullutslippsbygninger (ZEB). Retningslinjer og beregningsmetoder. https://www.byggforsk.no/dokument/5177/nullutslippsbygninger_zeb_retningslinjer_og_beregningsmetoder, 2017, Hentet 04.05.2022.
- [46] Statkraft AS. BREEAM nøkkeltall for Trondheim.
<https://www.statkraftvarme.no/globalassets/0/statkraft-varme/om-fjernvarme2/klima-og-miljo/breeam-dokumentasjon/2021/breeam-nokkeltall-trondheim.pdf>, 23.02.2022, Hentet 09.05.2022.
- [47] Fortum. Nøkkeltall for miljø og klima 2021.
<https://www.fortum.no/om-oss/miljo-samfunnsansvar/miljoarbeid-i-fortum-oslo-varme/nokkeltall-miljo-og-klima-2021>, Hentet 10.05.2022.
- [48] D. Pinel. Clustering methods assessment for investment in zero emission neighborhoods' energy system. 2020.
- [49] N. H. Sandberg, I. Sartori, M. I. Vestrum, and H. Brattebø. Using a segmented dynamic dwelling stock model for scenario analysis of future energy demand: The dwelling stock of norway 2016-2050. 2017.
- [50] S. Carlucci, M. De Simone, S. K. Firth, M. B. Kjærgård, R. Markovic, M. S. Rahaman, M. K. Annaqeeb, S. Biandrate, A. Das, J. W. Dziejczic, G. Fajilla, M. Favero, M. Ferrando, J. Hahn, M. Han, Y. Peng, F. Salim, A. Schluter, and C. v. Treeck. Modeling occupant behavior in buildings. 2020.
- [51] R. G. Junker, A. G. Azar, R. A. Lopes, K. B. Lindberg, G. Reynders, R. Relan, and H. Madsen. Characterizing the energy flexibility of buildings and districts. 2018.
- [52] A. Mossing, M. Røise, and T. Vigmostad. Lønnsomhet ved omfattende energioppgradering av et 60-tallshus. 2020.
- [53] J. S. Skullestad. Bygging av høyhus i tre som et klimatiltak. 2016.
- [54] Standard Norge. Standard norge.
<https://www.standard.no/toppvalg/om-oss/standard-norge/>, Hentet 21.03.2022.
- [55] Tekna. Dette trenger du for å gjøre en energiberegning.
<https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/dette-trenger-du-for-a-gjore-en-energiberegning/>, 2021, Hentet 23.03.2022.

- [56] Programbyggerne. Introduksjon til simien. https://www.programbyggerne.no/SIMIEN/doku.php?id=introduksjon#liste_med_inndataelementer, 2016, Hentet 23.03.2022.
- [57] SINTEF. Models linking and input harmonization. https://www.sintef.no/contentassets/a479c31823f14ce6b13e921bdf0ec046/01_models-linking--input-harmonization.pdf, pages 13–17, 09.03.2021.
- [58] PyPSA. Introduction. <https://pypsa.readthedocs.io/en/latest/introduction.html>, Hentet 04.04.2022.
- [59] One Click LCA. One Click LCA NS 3720. <https://www.oneclicklca.com/se/certifications/one-click-lca-ns-3720/>, Hentet 04.04.2022.
- [60] Sluppen. Alo - fremtidens arbeidsplass på sluppen. <https://www.sluppen.no/bygningene/alo/>, Hentet 03.05.2022.

A Vedlegg

Vedlagt finnes artikkel om prosjektet og poster:

- Artikkel: Optimalisering av energikonsept - generering av inndata og følsomhet
- Poster

B Vedlegg

Dette vedlegget inneholder årssimulering fra SIMIEN, samt resultat fra simulering i PVsyst, og er lagt til i denne rekkefølgen:

- Årssimulering
- Årssimulering - endret lekkasjetall
- Årssimulering - endret tilluft/avtrekk
- PVsyst - Tak
- PVsyst - Østfasade
- PVsyst - Sørfasade
- PVsyst - Vestfasade

OPTIMALISERING AV ENERGIKONSEPT FOR BYGNINGER – GENERERING AV INNDATA OG FØLSOMHET

Ane Mossing | Bacheloroppgave 2022-30 – NTNU Trondheim

Det største verdensproblemet i dag er klimaendringer, og problemene disse endringene medfører. Ett av problemene er det store energiforbruket. I Norge utgjør bygg 40 % av det totale energiforbruket, det er derfor viktig å sikre effektiv energibruk for å nå klimamålene og unngå utbygging av unødvendig kraftproduksjon.

Et viktig virkemiddel for å kunne sikre mer effektiv energibruk i bygg, er å benytte seg av gode beregnings- og simuleringstøytøyer. Riktig simulering av forbruksprofiler, medfører at dimensjoneringen av energikonsept for bygg vil kunne bli mer nøyaktig.

Hovedfokuset i oppgaven er å se på hvordan valg av inndata påvirker lønnsomhet og miljøpåvirkning, for å finne det optimale energikonseptet for et bygg. Basert på vannbåren varme som distribusjonssystem, ble tre energikonsept som kan benyttes i et kontorbygg satt opp. Disse er omtalt som BergVP, LuftVP og Fjernvarme. For å dekke oppvarmings- og kjølebehovet består BergVP av bergvarmepumpe og elkjel, LuftVP av luft/vannvarmepumpe og elkjel, mens Fjernvarme benytter fjernvarme og kjølemaskin.

To simuleringstøytøyer benyttes for å finne forbruksprofiler; SIMIEN og PROFet. I SIMIEN legges det til grunn bruk av elektrisitet til oppvarming- og kjølebehov for å finne forbruksprofil. I PROFet legges det kun inn areal og klimadata for Trondheim. For å finne det årlige energiforbruket ble et program utviklet av Multiconsult benyttet. Programmet benyttes også for å se om det er lønnsomt å installere solceller på tak og fasade.

For å kunne måle lønnsomhet og klimagassutslipp fra de ulike energikonseptene gjøres LCC- og LCA-beregninger. Det utføres følsomhetsanalyse for å se hvordan nåverdi endrer seg med økende strømpris, og hvordan klimagassutslippene for fjernvarme blir påvirket av valgt forbruksmiks.

Tabell 1: Resultat fra LCC- og LCA-beregninger.

	BergVP	LuftVP	Fjernvarme
Årlig energiforbruk_sim [kWh]	534 110	545 385	705 059
Årlig energiforbruk_prof [kWh]	1 886 796	1 908 285	2 237 920
Nåverdi_sim [NOK]	1 289 178	593 933	-3 642 681
Nåverdi_prof [NOK]	10 358 412	5 843 338	-5 070 912
Klimagassutslipp [kgCO₂e]	4 524 347	4 626 155	5 900 006

Tabell 1 viser resultat fra LCC- og LCA-beregninger for de tre energikonseptene med ulik forbruksprofil. De beregnede forbruksprofilene viste store forskjeller, dette påvirker også årlig energiforbruk. Dette medfører store forskjeller i nåverdi, hvor kun to av konseptene ender med positiv verdi. Klimagassutslippene er beregnet for energikonsept med forbruksprofil fra SIMIEN; her er det små forskjeller.

I **følsomhetsanalysen** for nåverdi ble spotpris variert opp til 2,4 kr/kWh. Resultatet ble da at positiv nåverdi ved start forble positiv med høyere spotpris, og for negativ nåverdi fra start ble verdien mer negativ med høyere spotpris.

Følsomhetsanalysen for forbruksmiks for fjernvarme viste at valg av forbruksmiks påvirker resultatet i stor grad, og høyere forbruksmiks gir større utslipp.

Fra analysen er det tydelig av lønnsomhet og miljøpåvirkning fra de ulike energikonseptene er sterkt knyttet til valg av inndata fra forbruksprofil, strømpris og forbruksmiks.

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Optimalisering av energikonsept for bygninger – Generering av inndata og følsomhet Optimization of Energy Concept for Buildings – Generation of Input Data and Sensitivity

Prosjektnr. 2022-30
Intern veileder: Rolf André Bohne

Student: Ane Mossing
Ekstern kontakt: Elisabeth Wærnes, Multiconsult AS

Formål og problemstilling

Formålet med oppgaven er å se på hvordan valg av inndata påvirker lønnsomhet og miljøpåvirkning for å finne det optimale energikonseptet for et bygg. Ønsket er å kunne gjennomføre mer nøyaktige simuleringer av energibehovet, som vil gi bedre vurdering av hva som er det beste energikonseptet. Problemstilling:

Hvordan kan inndata for forbruksprofil og følsomhet best genereres?

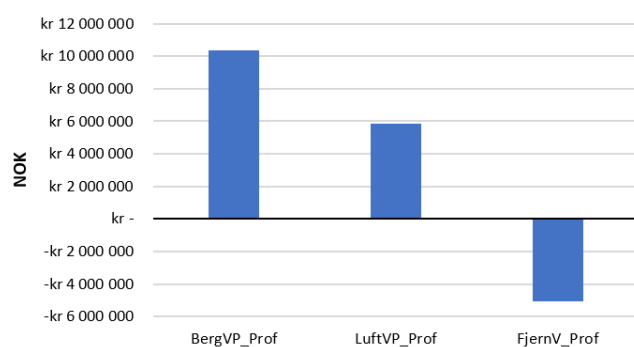
Metode

Tre energikonsept som kan benyttes i et kontorbygg settes opp:

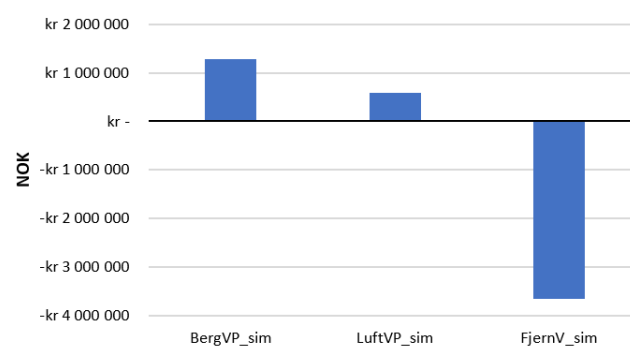
- **BergVP** (baserer seg på bergvarmepumpe og elkjel)
- **LuftVP** (baserer seg på luft/vann-varmepumpe og elkjel)
- **Fjernvarme** (baserer seg på fjernvarme og kjølemaskin)

Lastprofil for de ulike konseptene finnes ved bruk av SIMIEN og PROFet. Videre gjøres LCC-beregninger i Excel og LCA i One Click LCA. Det ble gjennomført følsomhetsanalyse for å se hvordan nåverdi endrer seg med økende strømpris, og hvordan klimagassutslippene for fjernvarme blir påvirket av valgt forbruksmiks.

Nåverdi - lastprofil PROFet



Nåverdi - lastprofil SIMIEN



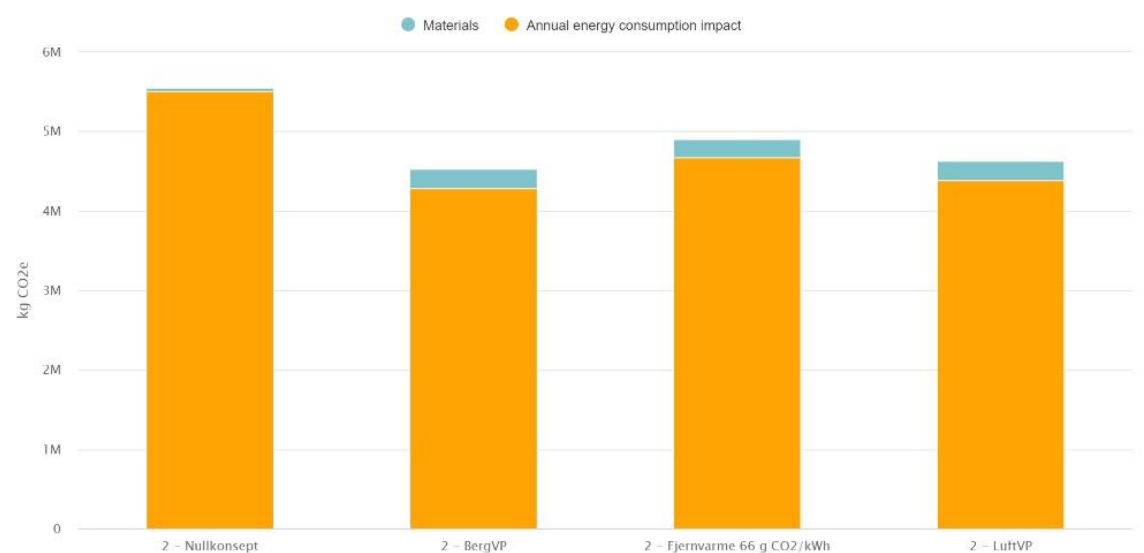
Resultat fra LCC og LCA

Nåverdiene ble påvirket av de store forskjellene i årlig energiforbruk som ble regnet ut med lastprofiler fra PROFet og SIMIEN. Kun to av energikonseptene endte med positiv nåverdi, dette var varmepumpealternativene. Det var mindre forskjell i klimagassutslipp med valgt forbruksmiks for elektrisitet og fjernvarme.

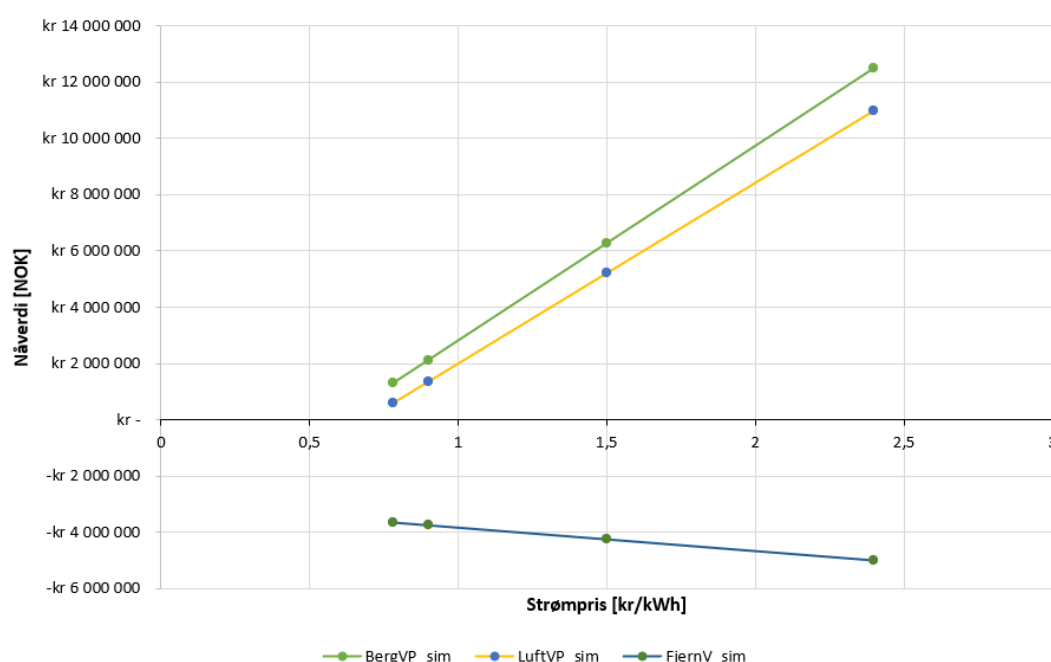
Diskusjon

De store forskjellene i lastprofil fra PROFet og SIMIEN, medførte at det ble gjort følsomhetsanalyse på inndata i de to programmene. Dette ga små forskjeller, og det antas derfor datagrunnlaget i PROFet er for lite til å gi gode nok lastprofiler.

Fra følsomhetsanalysen for nåverdi kom det tydelig fram at BergVP og LuftVP forble positive med økt strømpris, mens Fjernvarme forble negativ. Basert på trenden i grafen ser det ut til at svært lave strømpriser må til for å få positiv nåverdi for dette alternativet. Med tanke på fremtidsutsiktene i kraftmarkedet, er det usannsynlig at strømprisene vil bli såpass lave.



Følsomhetsanalyse for nåverdiberegning



Konklusjon

Basert på resultatene er det tydelig at lønnsomhet og miljøpåvirkning fra de ulike energikonseptet er sterkt knyttet til valg av inndata fra forbruksprofil, strømpris og forbruksmiks. De store forskjellene i forbruksprofil viser at PROFet per dags dato ikke er optimalt å benytte for å finne lastprofil for ett enkelt kontorbygg med passivhusstandard.

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: bachelorprosjekt_pyceso_trondheim

Variant: Flatt tak

Rows as domes east-west

System power: 152 kWp

Nidarvoll - Norway

Author

Multiconsult (Norway)

**PVsyst V7.2.12**

VCO, Simulation date:
14/03/22 14:34
with v7.2.12

Multiconsult (Norway)

Project summary**Geographical Site**

Nidarvoll
Norway

Situation

Latitude 63.40 °N
Longitude 10.40 °E
Altitude 32 m
Time zone UTC+1

Meteo data

Nidarvoll
Meteonorm 8.0 (1991-2013) - Synthetic

Monthly albedo values

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Albedo	0.80	0.80	0.80	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.70

System summary**Grid-Connected System****PV Field Orientation**

Fixed planes 2 orientations
Tilts/azimuths 10 / 107 °
10 / -73 °

Rows as domes east-west**Near Shadings**

Linear shadings

User's needs

Unlimited load (grid)

System information**PV Array**

Nb. of modules
Pnom total

448 units
152 kWp

Inverters

Nb. of units
Pnom total
Pnom ratio

1 unit
143 kWac
1.065

Results summary

Produced Energy 106.9 MWh/year Specific production 702 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 78.74 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Horizon definition	5
Near shading definition - Iso-shadings diagram	6
Main results	8
Loss diagram	9
Special graphs	10



PVsyst V7.2.12

VC0, Simulation date:
14/03/22 14:34
with v7.2.12

Multiconsult (Norway)

General parameters

Grid-Connected System

PV Field Orientation

Orientation

Fixed planes 2 orientations
Tilts/azimuths 10 / 107 °
10 / -73 °

Horizon

Average Height 2.9 °

Rows as domes east-west

Sheds configuration

Nb. of sheds 24 units

Sizes

Sheds spacing 1.20 m
Collector width 1.05 m
Ground Cov. Ratio (GCR) 87.7 %

Shading limit angle

Limit profile angle 50.1 °

Near Shadings

Linear shadings

Models used

Transposition Perez
Diffuse Perez, Meteonorm
Circumsolar separate

User's needs

Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer Generic
Model Mono 340 Wp Twin 120 half-cells
(Original PVsyst database)

Unit Nom. Power 340 Wp
Number of PV modules 448 units
Nominal (STC) 152 kWp
Modules 16 Strings x 28 In series

At operating cond. (50°C)

Pmpp 137 kWp
U mpp 835 V
I mpp 164 A

Total PV power

Nominal (STC) 152 kWp
Total 448 modules
Module area 837 m²
Cell area 742 m²

Inverter

Manufacturer SMA
Model Sunny Highpower SHP143-JP-20-PEAK3
(Original PVsyst database)

Unit Nom. Power 143 kWac
Number of inverters 1 unit
Total power 143 kWac
Operating voltage 784-1450 V
Pnom ratio (DC:AC) 1.07

Total inverter power

Total power 143 kWac
Number of inverters 1 unit
Pnom ratio 1.07

Array losses

Array Soiling Losses

Average loss Fraction 22.3 %

Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
60.0%	75.0%	45.0%	8.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	15.0%	53.0%

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. 86 mΩ
Loss Fraction 1.5 % at STC

Serie Diode Loss

Voltage drop 0.7 V
Loss Fraction 0.1 % at STC

LID - Light Induced Degradation

Loss Fraction 2.0 %

Module Quality Loss

Loss Fraction -0.4 %

Module mismatch losses

Loss Fraction 2.0 % at MPP

Strings Mismatch loss

Loss Fraction 0.1 %



PVsyst V7.2.12

VC0, Simulation date:
14/03/22 14:34
with v7.2.12

Array losses

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



Horizon definition

Horizon from PVGIS website API, Lat=63°23'51', Long=10°23'48', Alt=m

Average Height 2.9 ° Albedo Factor 0.75
Diffuse Factor 0.99 Albedo Fraction 100 %

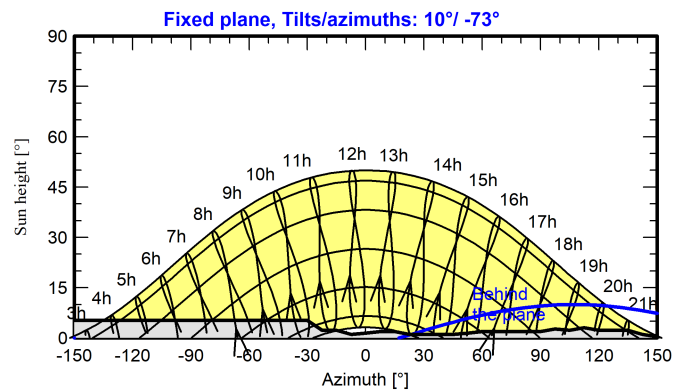
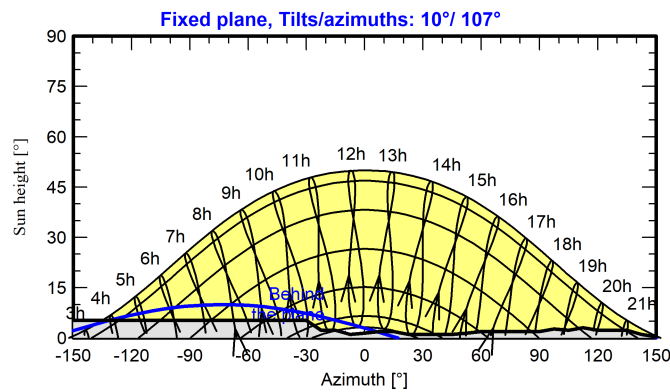
Horizon profile

Azimuth [°]	-180	-173	-165	-158	-150	-30	-23	-15	-8	0	8	15	23	45
Height [°]	0.8	0.8	1.1	1.1	5.3	5.3	2.3	2.3	1.1	1.5	1.9	1.9	1.1	1.1
Azimuth [°]	53	60	90	98	105	113	120	135	143	150	158	165	173	180
Height [°]	1.5	1.9	1.9	2.7	2.3	3.1	2.3	2.3	1.1	0.4	0.8	1.1	1.1	0.8

Sun Paths (Height / Azimuth diagram)

Orientation #1

Orientation #2



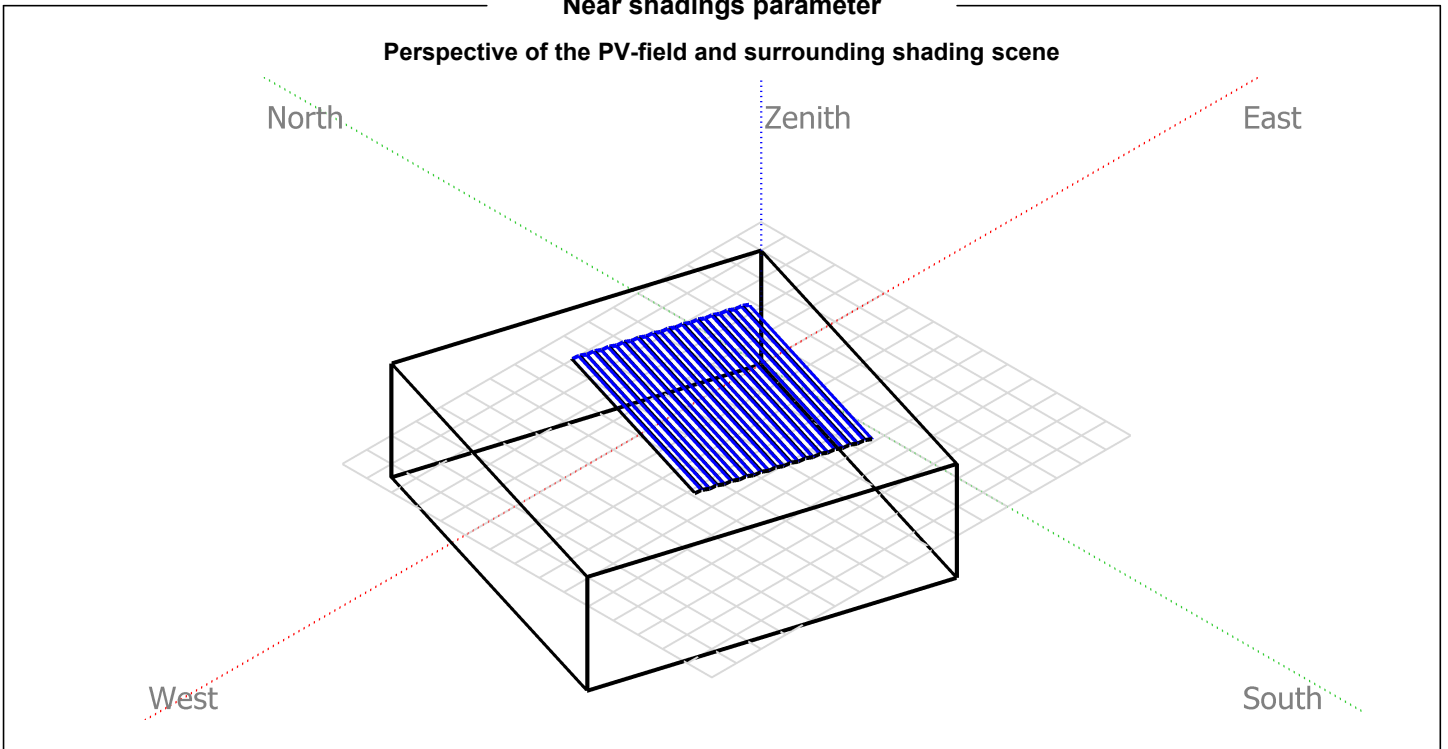


PVsyst V7.2.12

VC0, Simulation date:
14/03/22 14:34
with v7.2.12

Near shadings parameter

Perspective of the PV-field and surrounding shading scene

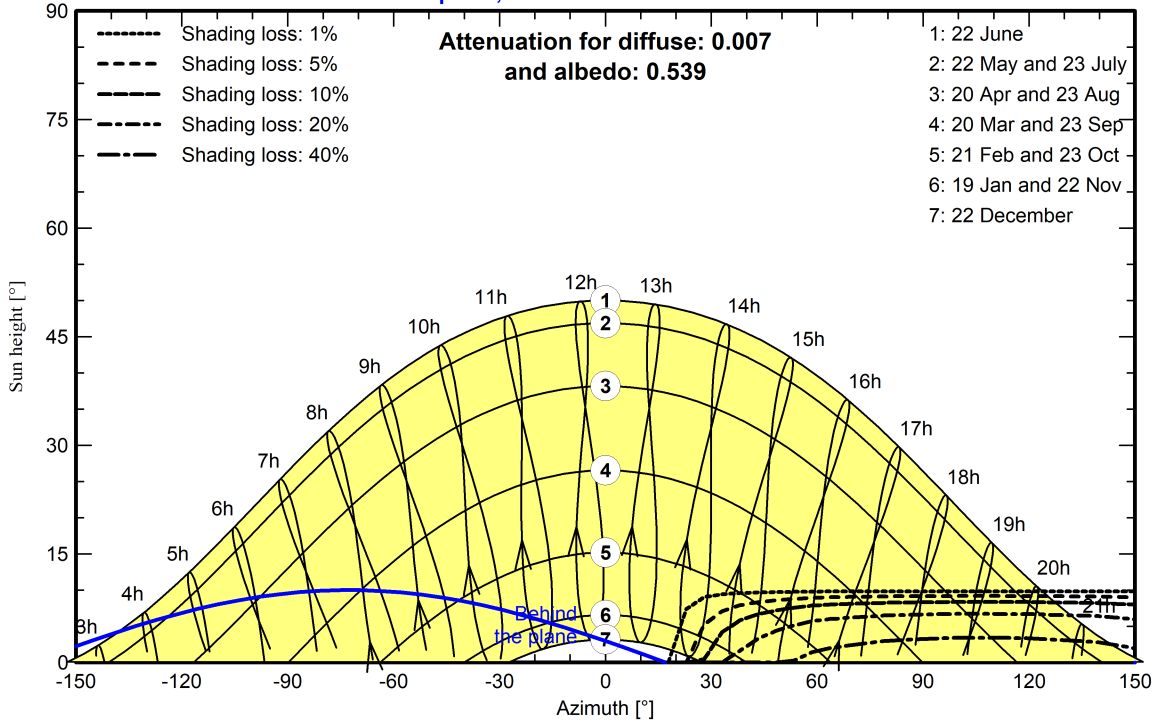




Iso-shadings diagram

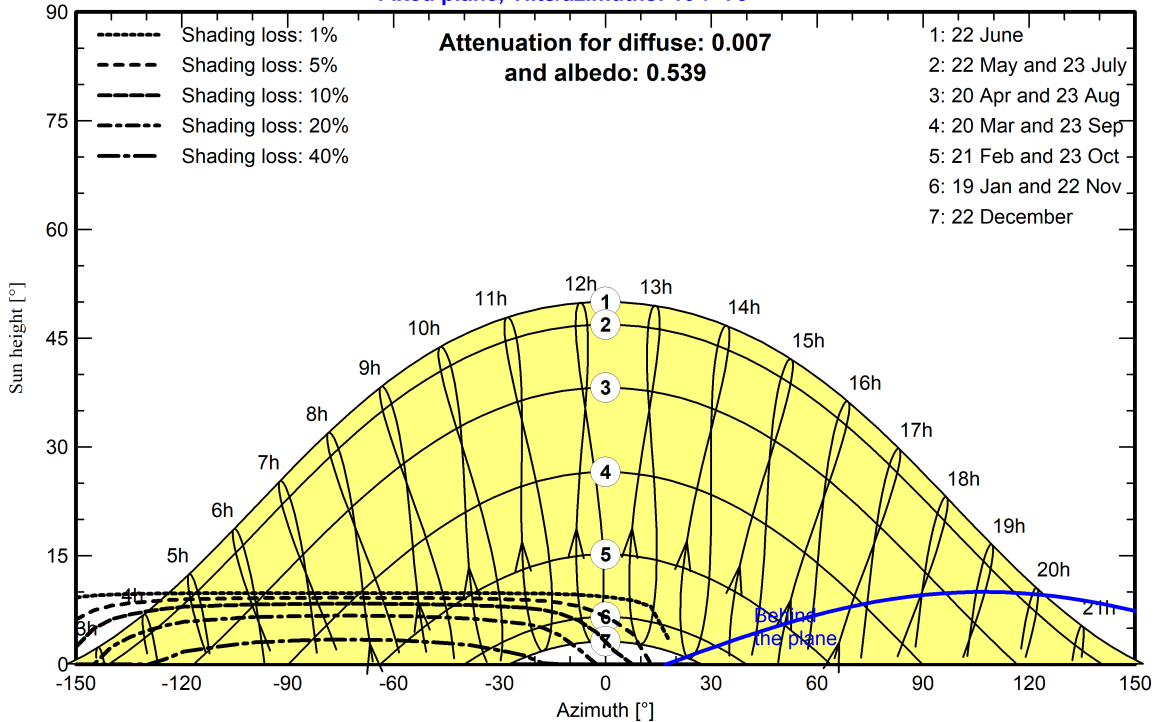
Orientation #1

Fixed plane, Tilts/azimuths: 10°/ 107°



Orientation #2

Fixed plane, Tilts/azimuths: 10°/ -73°





Main results

System Production

Produced Energy 106.9 MWh/year

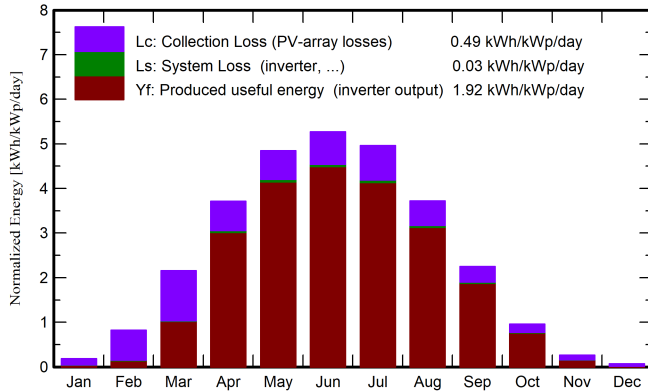
Specific production

702 kWh/kWp/year

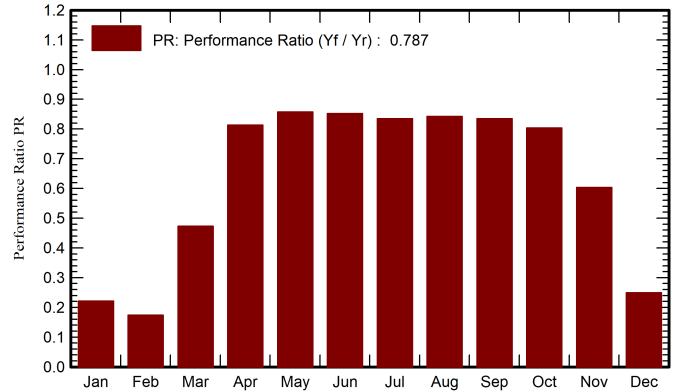
Performance Ratio PR

78.74 %

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 MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	5.7	3.87	-1.14	5.7	1.7	0.23	0.19	0.222
February	22.8	11.62	-1.05	22.9	4.7	0.66	0.61	0.174
March	66.6	26.82	0.83	66.8	33.0	4.90	4.81	0.473
April	111.5	43.34	5.21	111.5	95.8	13.98	13.81	0.813
May	151.0	68.16	9.52	150.2	140.1	19.86	19.61	0.857
June	159.3	83.58	12.30	158.2	147.7	20.79	20.53	0.852
July	154.9	68.64	15.69	153.8	143.6	19.80	19.55	0.835
August	116.1	59.18	14.92	115.3	107.1	14.98	14.80	0.843
September	67.7	32.92	10.95	67.4	61.1	8.69	8.58	0.835
October	29.7	18.17	6.15	29.6	25.5	3.69	3.62	0.804
November	8.0	5.29	2.17	7.8	5.3	0.75	0.72	0.604
December	2.3	1.82	-0.41	2.1	0.8	0.10	0.08	0.249
Year	895.5	423.43	6.31	891.4	766.4	108.44	106.91	0.787

Legends

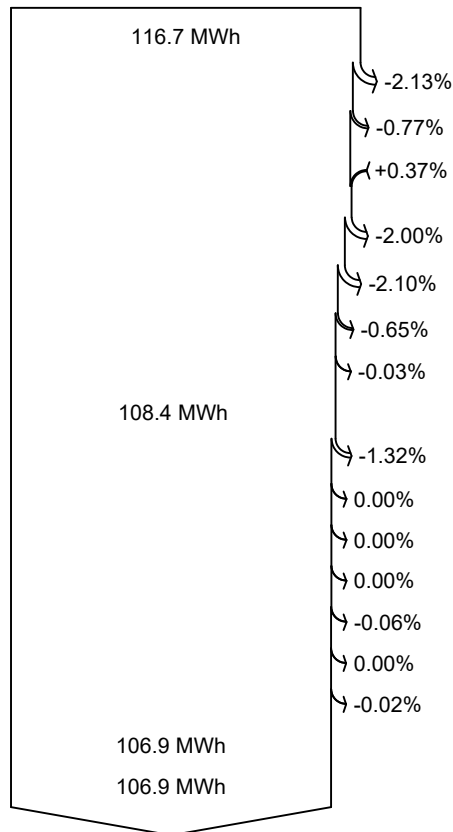
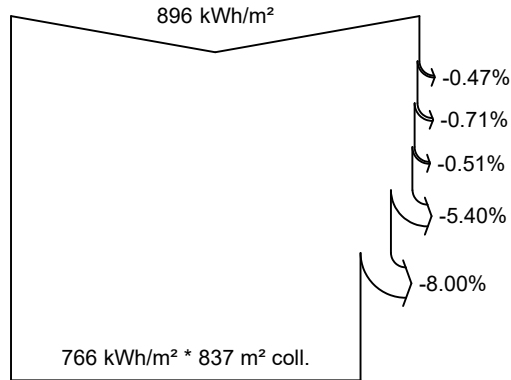
- GlobHor Global horizontal irradiation
- DiffHor Horizontal diffuse irradiation
- T_Amb Ambient Temperature
- GlobInc Global incident in coll. plane
- GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
- EArray Effective energy at the output of the array
- E_Grid Energy injected into grid
- PR Performance Ratio



PVsyst V7.2.12

VCO, Simulation date:
14/03/22 14:34
with v7.2.12

Loss diagram



Global horizontal irradiation

Global incident in coll. plane

- Far Shadings / Horizon
- Near Shadings: irradiance loss
- IAM factor on global

Soiling loss factor

Effective irradiation on collectors

PV conversion

Array nominal energy (at STC effic.)

- PV loss due to irradiance level
- PV loss due to temperature
- Module quality loss

LID - Light induced degradation

Mismatch loss, modules and strings

Ohmic wiring loss

Mixed orientation mismatch loss

Array virtual energy at MPP

- Inverter Loss during operation (efficiency)
- Inverter Loss over nominal inv. power
- Inverter Loss due to max. input current
- Inverter Loss over nominal inv. voltage
- Inverter Loss due to power threshold
- Inverter Loss due to voltage threshold
- Night consumption

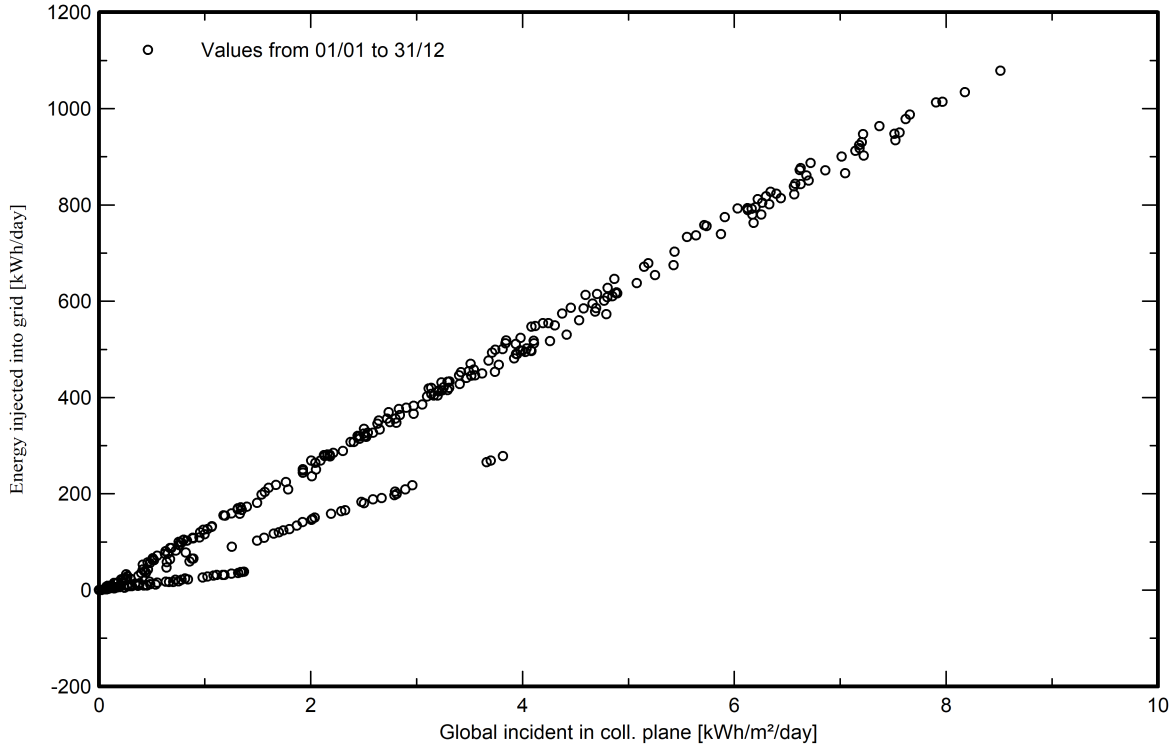
Available Energy at Inverter Output

Energy injected into grid

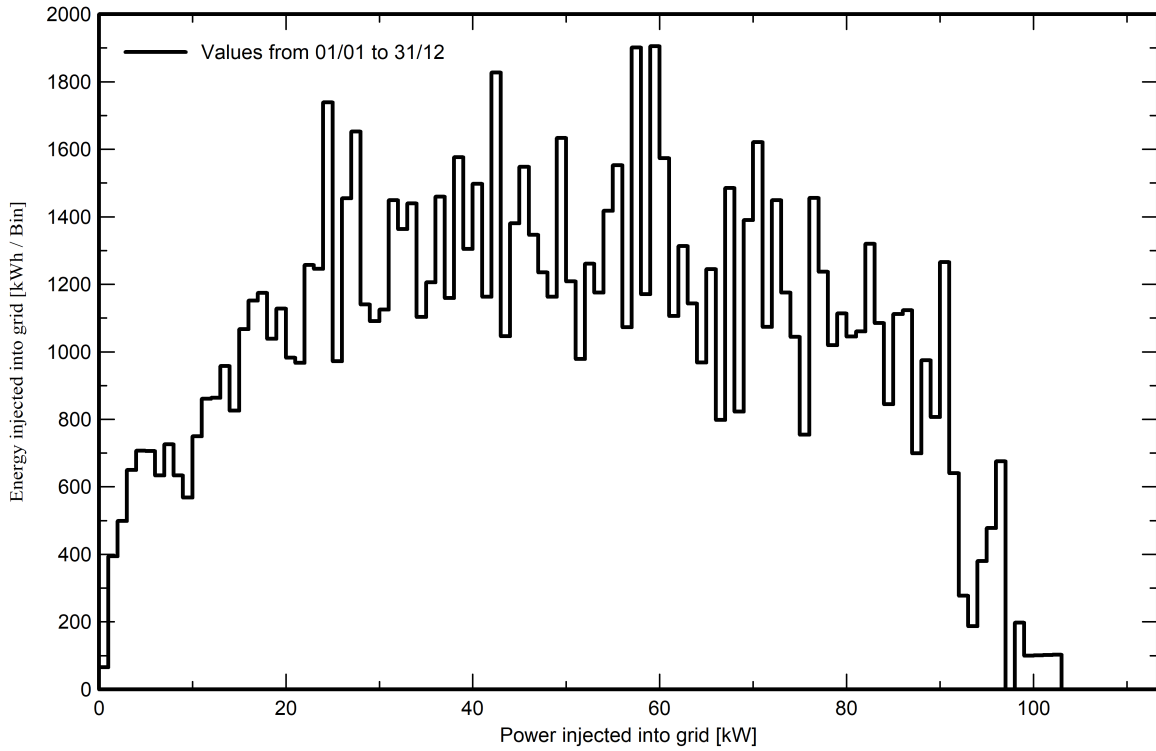


Special graphs

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution



PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: bachelorprosjekt_pyceso_trondheim

Variant: East facade

Sheds on ground

System power: 218 kWp

Nidarvoll - Norway

**PVsyst V7.2.12**

VC2, Simulation date:
14/03/22 14:49
with v7.2.12

Multiconsult (Norway)

Project summary**Geographical Site**

Nidarvoll
Norway

Situation

Latitude 63.40 °N
Longitude 10.40 °E
Altitude 32 m
Time zone UTC+1

Meteo data

Nidarvoll
Meteonorm 8.0 (1991-2013) - Synthetic

Monthly albedo values

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Albedo	0.80	0.80	0.80	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.70

System summary**Grid-Connected System****PV Field Orientation**

Fixed plane
Tilt/Azimuth 90 / -73 °

Sheds on ground**Near Shadings**

Linear shadings

User's needs

Unlimited load (grid)

System information**PV Array**

Nb. of modules 640 units
Pnom total 218 kWp

Inverters

Nb. of units 3 units
Pnom total 188 kWac
Pnom ratio 1.161

Results summary

Produced Energy 150.5 MWh/year Specific production 691 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 85.64 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Near shading definition - Iso-shadings diagram	4
Main results	5
Loss diagram	6
Special graphs	7



PVsyst V7.2.12

VC2, Simulation date:
14/03/22 14:49
with v7.2.12

Multiconsult (Norway)

General parameters

Grid-Connected System		Sheds on ground			
PV Field Orientation		Sheds configuration		Models used	
Orientation				Transposition Perez	
Fixed plane				Diffuse Perez, Meteonorm	
Tilt/Azimuth 90 / -73 °				Circumsolar separate	
Horizon		Near Shadings		User's needs	
Free Horizon		Linear shadings		Unlimited load (grid)	

PV Array Characteristics

PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	SMA
Model	Mono 340 Wp Twin 120 half-cells	Model	Sunny Tripower STP62-US-41-Core1
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	340 Wp	Unit Nom. Power	62.5 kWac
Number of PV modules	640 units	Number of inverters	3 units
Nominal (STC)	218 kWp	Total power	188 kWac
Modules	32 Strings x 20 In series	Operating voltage	150-800 V
At operating cond. (50°C)		Pnom ratio (DC:AC)	1.16
Pmpp	196 kWp	Total inverter power	
U mpp	596 V	Total power	188 kWac
I mpp	328 A	Number of inverters	3 units
Total PV power		Pnom ratio	1.16
Nominal (STC)	218 kWp	Total inverter power	
Total	640 modules	Total power	188 kWac
Module area	1196 m ²	Number of inverters	3 units
Cell area	1060 m ²	Pnom ratio	1.16

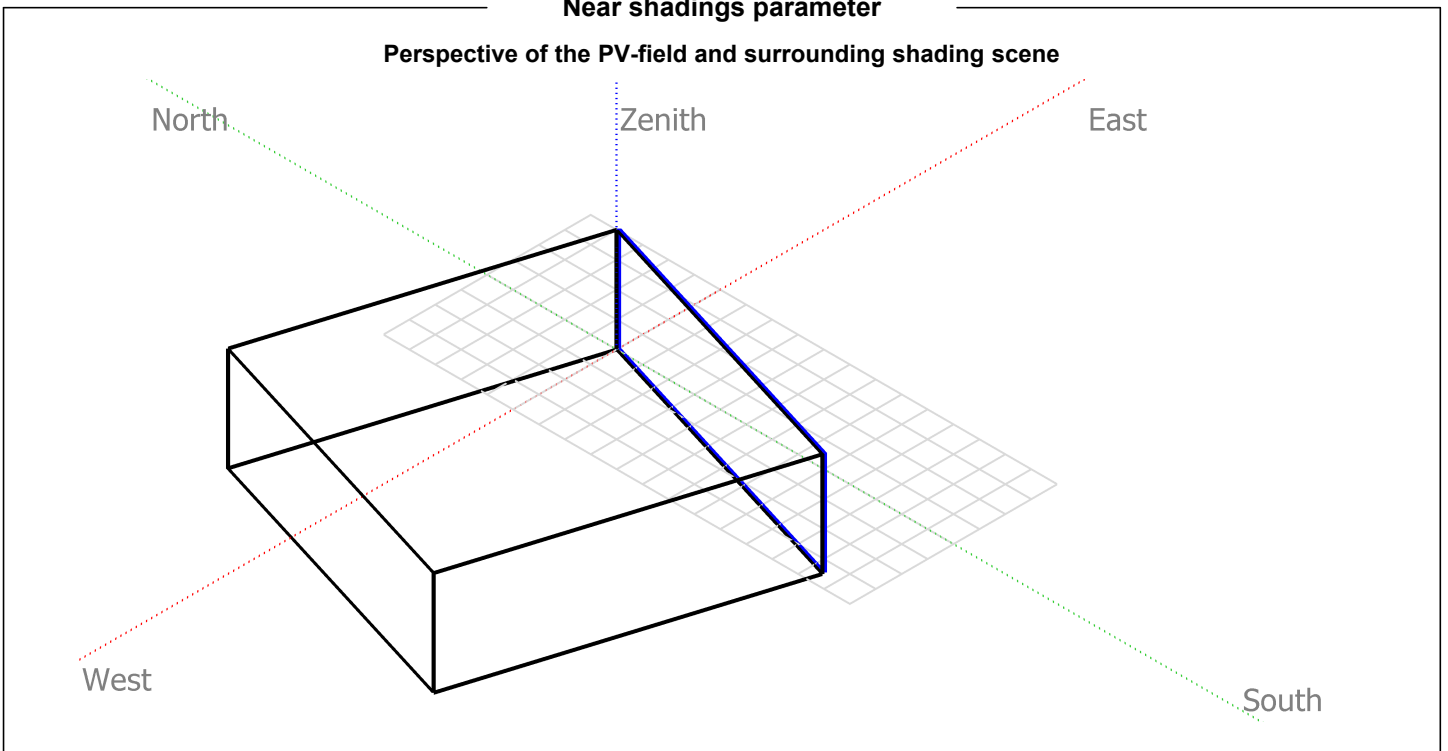
Array losses

Array Soiling Losses		Thermal Loss factor		DC wiring losses				
Loss Fraction	2.0 %	Module temperature according to irradiance		Global array res.	31 mΩ			
		Uc (const)	20.0 W/m ² K	Loss Fraction	1.5 % at STC			
		Uv (wind)	0.0 W/m ² K/m/s					
Serie Diode Loss		LID - Light Induced Degradation		Module Quality Loss				
Voltage drop	0.7 V	Loss Fraction	2.0 %	Loss Fraction	-0.4 %			
Loss Fraction	0.1 % at STC							
Module mismatch losses		Strings Mismatch loss						
Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.1 %					
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



Near shadings parameter

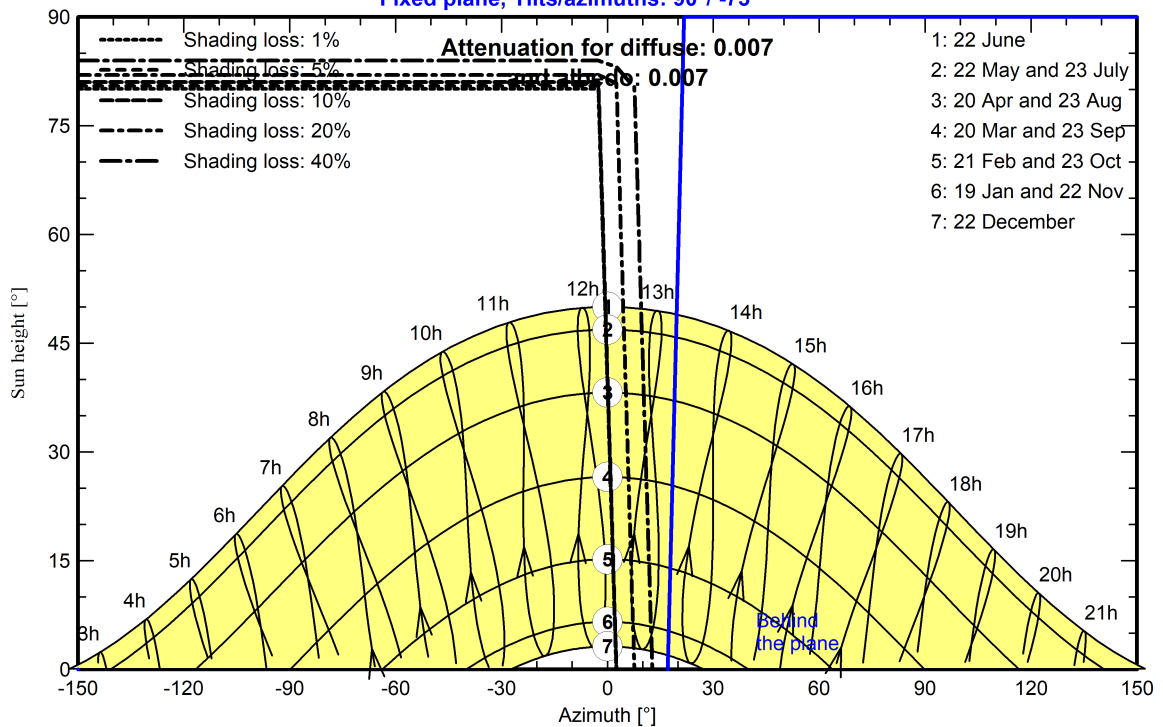
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1

Fixed plane, Tilts/azimuths: 90° / -73°





Main results

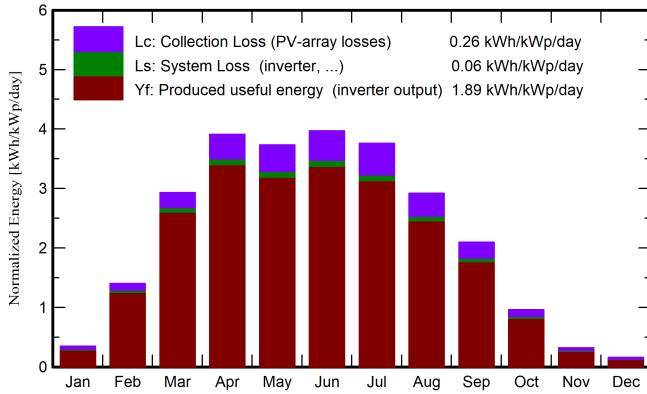
System Production

Produced Energy 150.5 MWh/year

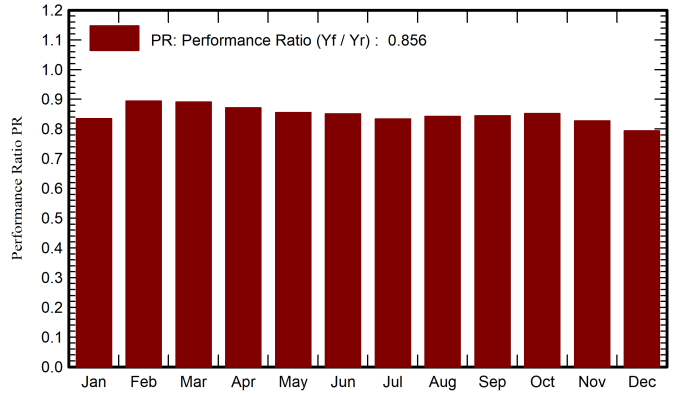
Specific production
Performance Ratio PR

691 kWh/kWp/year
85.64 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

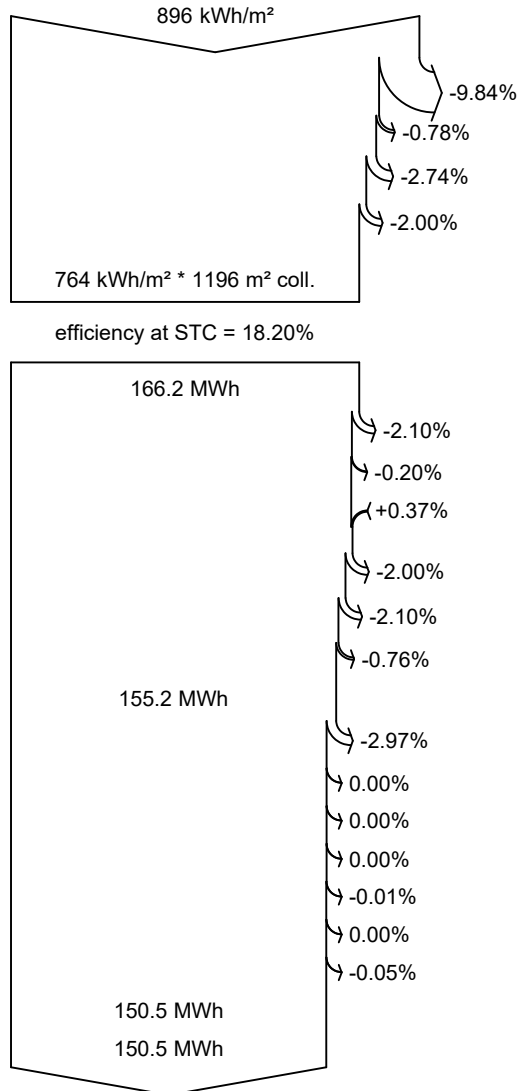
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	5.7	3.87	-1.14	10.7	9.7	2.04	1.94	0.834
February	22.8	11.62	-1.05	39.3	36.8	7.88	7.65	0.895
March	66.6	26.82	0.83	90.8	86.2	18.10	17.60	0.891
April	111.5	43.34	5.21	117.2	111.3	22.86	22.23	0.871
May	151.0	68.16	9.52	115.8	109.6	22.21	21.56	0.856
June	159.3	83.58	12.30	119.1	112.9	22.71	22.05	0.851
July	154.9	68.64	15.69	116.6	110.7	21.80	21.14	0.833
August	116.1	59.18	14.92	90.6	85.9	17.13	16.61	0.843
September	67.7	32.92	10.95	63.0	59.5	11.95	11.57	0.844
October	29.7	18.17	6.15	29.8	27.9	5.74	5.53	0.852
November	8.0	5.29	2.17	9.6	8.7	1.83	1.74	0.827
December	2.3	1.82	-0.41	4.9	4.2	0.89	0.84	0.794
Year	895.5	423.43	6.31	807.4	763.6	155.15	150.46	0.856

Legends

- GlobHor Global horizontal irradiation
- DiffHor Horizontal diffuse irradiation
- T_Amb Ambient Temperature
- GlobInc Global incident in coll. plane
- GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
- EArray Effective energy at the output of the array
- E_Grid Energy injected into grid
- PR Performance Ratio



Loss diagram



Global horizontal irradiation

Global incident in coll. plane

Near Shadings: irradiance loss

IAM factor on global

Soiling loss factor

Effective irradiation on collectors

PV conversion

Array nominal energy (at STC effic.)

PV loss due to irradiance level

PV loss due to temperature

Module quality loss

LID - Light induced degradation

Mismatch loss, modules and strings

Ohmic wiring loss

Array virtual energy at MPP

Inverter Loss during operation (efficiency)

Inverter Loss over nominal inv. power

Inverter Loss due to max. input current

Inverter Loss over nominal inv. voltage

Inverter Loss due to power threshold

Inverter Loss due to voltage threshold

Night consumption

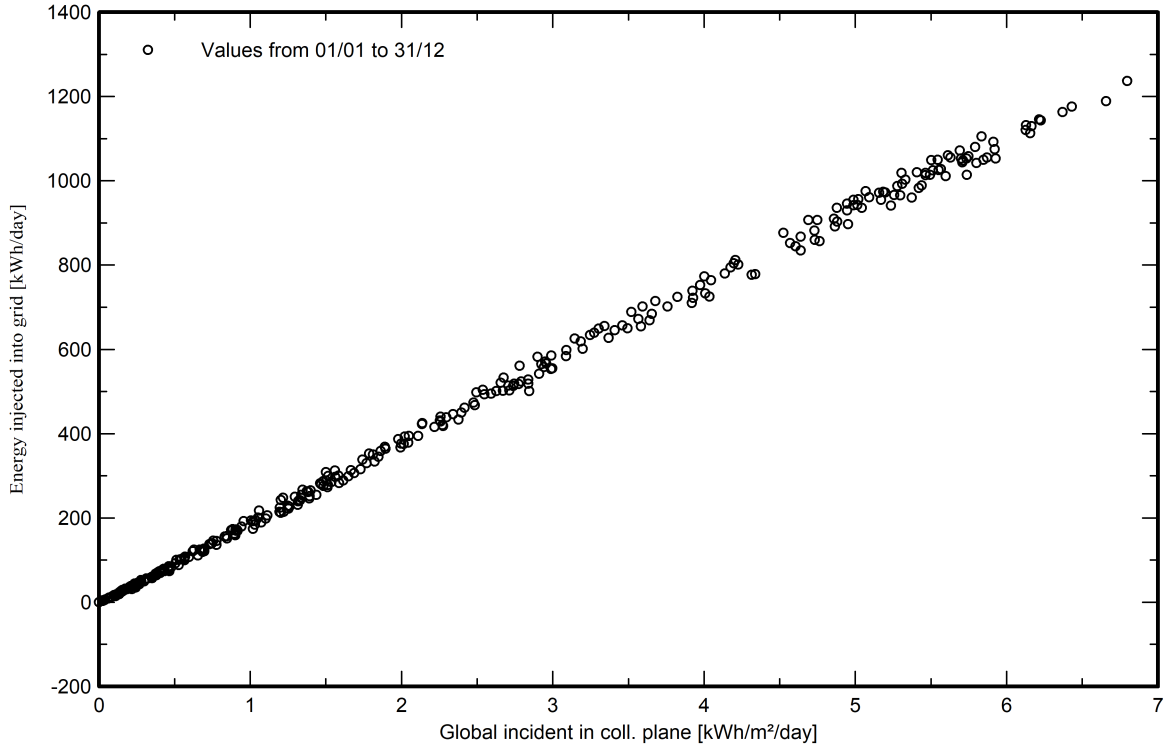
Available Energy at Inverter Output

Energy injected into grid

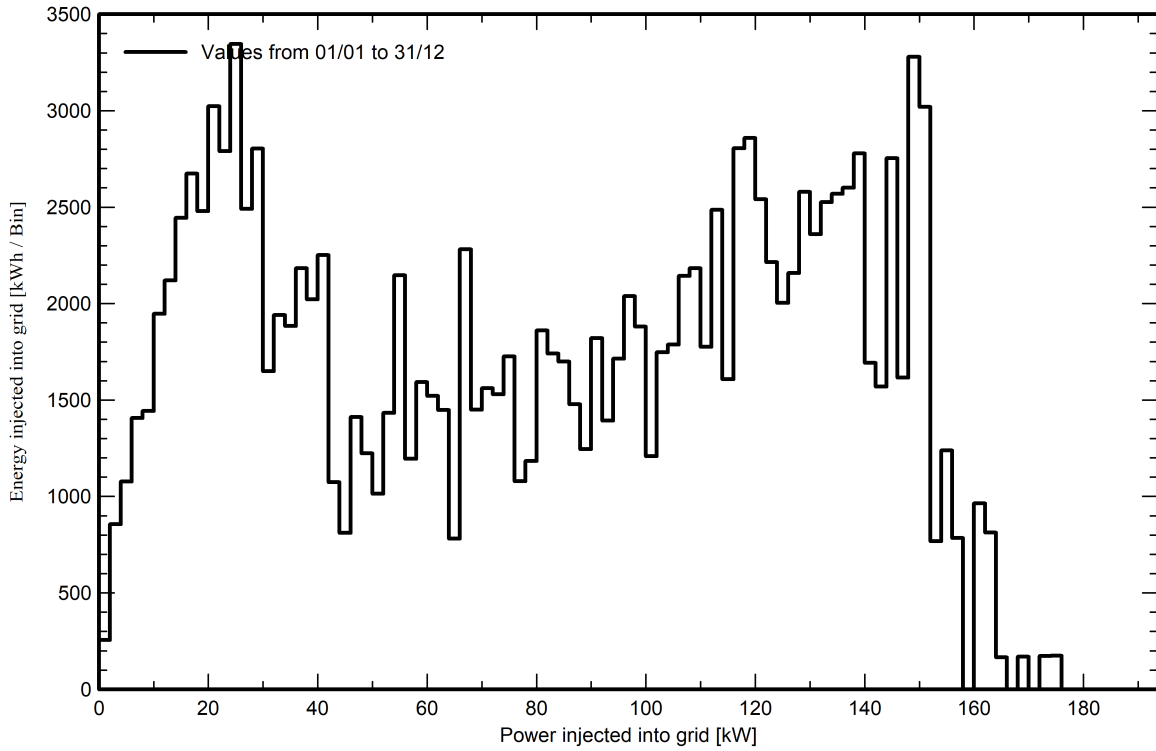


Special graphs

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution



PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: bachelorprosjekt_pyceso_trondheim

Variant: New simulation variant

Sheds on ground

System power: 218 kWp

Nidarvoll - Norway

**PVsyst V7.2.12**

VC1, Simulation date:
14/03/22 14:44
with v7.2.12

Multiconsult (Norway)

Project summary**Geographical Site**

Nidarvoll
Norway

Situation

Latitude 63.40 °N
Longitude 10.40 °E
Altitude 32 m
Time zone UTC+1

Meteo data

Nidarvoll
Meteonorm 8.0 (1991-2013) - Synthetic

Monthly albedo values

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Albedo	0.80	0.80	0.80	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.70

System summary**Grid-Connected System****PV Field Orientation**

Fixed plane
Tilt/Azimuth 90 / 17 °

Sheds on ground**Near Shadings**

Linear shadings

User's needs

Unlimited load (grid)

System information**PV Array**

Nb. of modules 640 units
Pnom total 218 kWp

Inverters

Nb. of units 3 units
Pnom total 188 kWac
Pnom ratio 1.161

Results summary

Produced Energy 183.3 MWh/year Specific production 843 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 85.39 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Near shading definition - Iso-shadings diagram	4
Main results	5
Loss diagram	6
Special graphs	7



PVsyst V7.2.12

VC1, Simulation date:
14/03/22 14:44
with v7.2.12

Multiconsult (Norway)

General parameters

Grid-Connected System		Sheds on ground			
PV Field Orientation		Sheds configuration		Models used	
Orientation				Transposition Perez	
Fixed plane				Diffuse Perez, Meteonorm	
Tilt/Azimuth 90 / 17 °				Circumsolar separate	
Horizon		Near Shadings		User's needs	
Free Horizon		Linear shadings		Unlimited load (grid)	

PV Array Characteristics

PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	SMA
Model	Mono 340 Wp Twin 120 half-cells (Original PVsyst database)	Model	Sunny Tripower STP62-US-41-Core1 (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	340 Wp	Unit Nom. Power	62.5 kWac
Number of PV modules	640 units	Number of inverters	3 units
Nominal (STC)	218 kWp	Total power	188 kWac
Modules	32 Strings x 20 In series	Operating voltage	150-800 V
At operating cond. (50°C)		Pnom ratio (DC:AC)	1.16
Pmpp	196 kWp		
U mpp	596 V		
I mpp	328 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	218 kWp	Total power	188 kWac
Total	640 modules	Number of inverters	3 units
Module area	1196 m ²	Pnom ratio	1.16
Cell area	1060 m ²		

Array losses

Array Soiling Losses		Thermal Loss factor		DC wiring losses				
Loss Fraction	2.0 %	Module temperature according to irradiance		Global array res.	31 mΩ			
		Uc (const)	20.0 W/m ² K	Loss Fraction	1.5 % at STC			
		Uv (wind)	0.0 W/m ² K/m/s					
Serie Diode Loss		LID - Light Induced Degradation		Module Quality Loss				
Voltage drop	0.7 V	Loss Fraction	2.0 %	Loss Fraction	-0.4 %			
Loss Fraction	0.1 % at STC							
Module mismatch losses		Strings Mismatch loss						
Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.1 %					
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

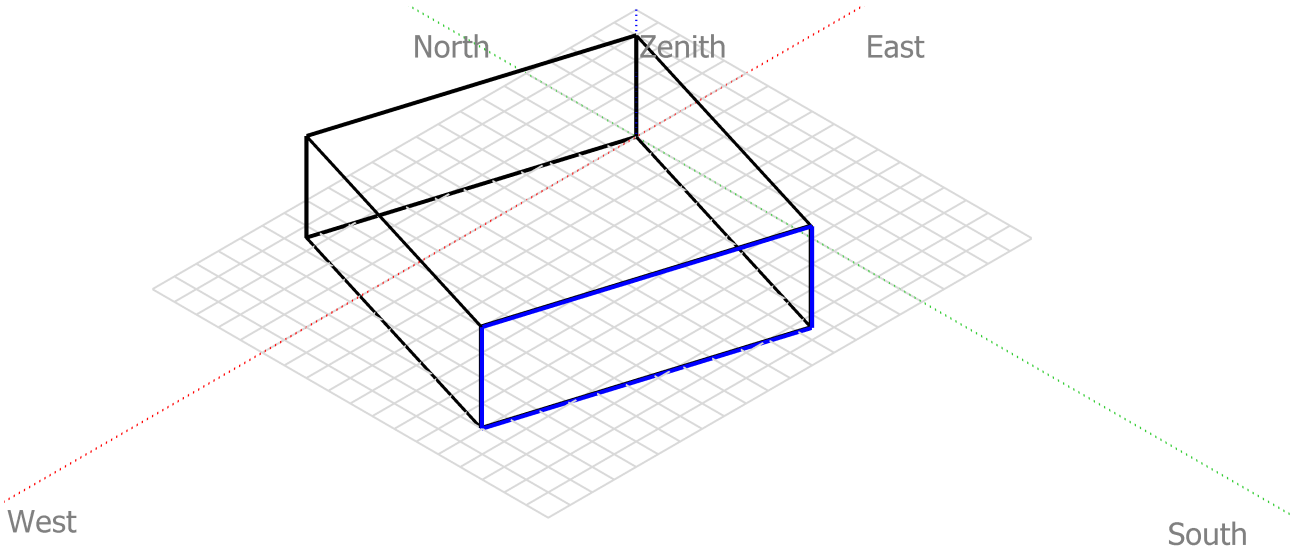


PVsyst V7.2.12

VC1, Simulation date:
14/03/22 14:44
with v7.2.12

Near shadings parameter

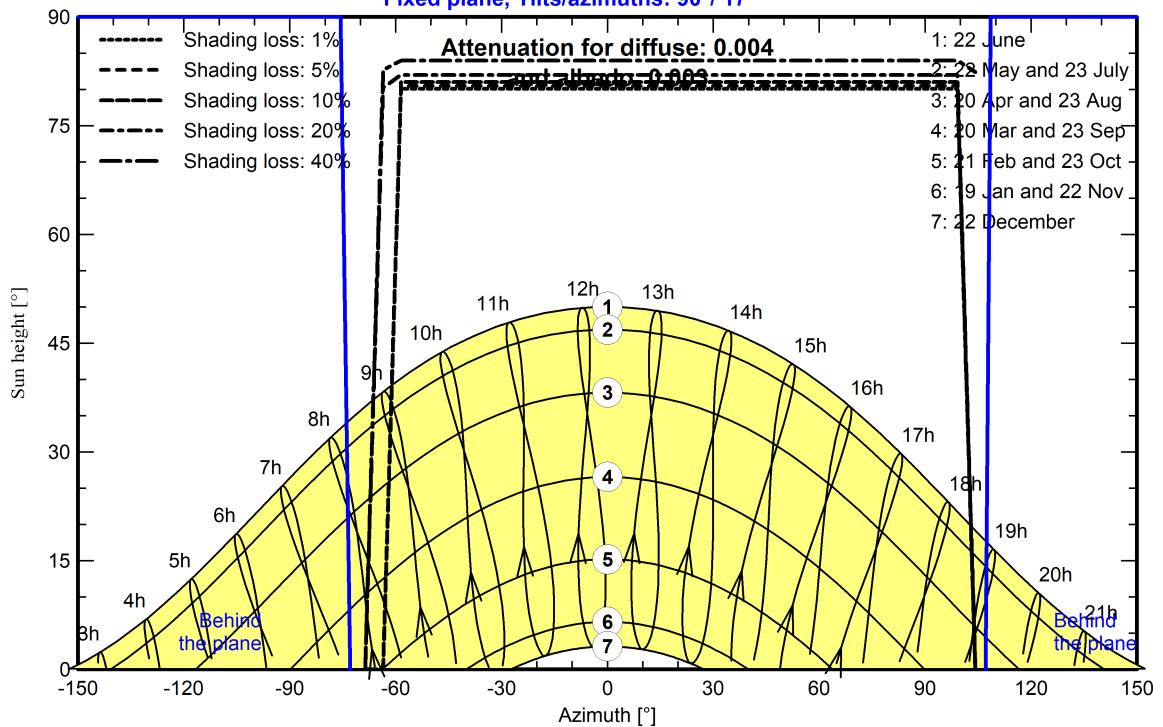
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1

Fixed plane, Tilts/azimuths: 90°/ 17°





Main results

System Production

Produced Energy 183.3 MWh/year

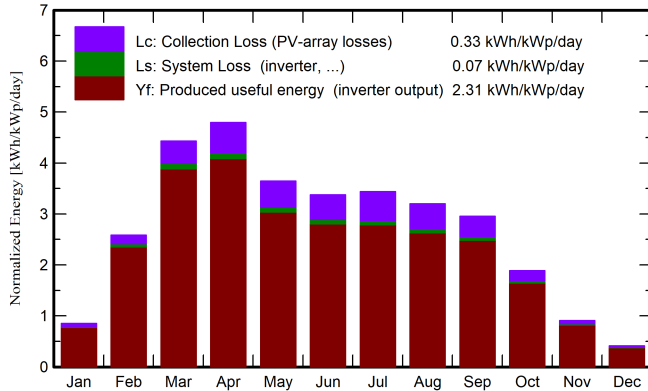
Specific production

843 kWh/kWp/year

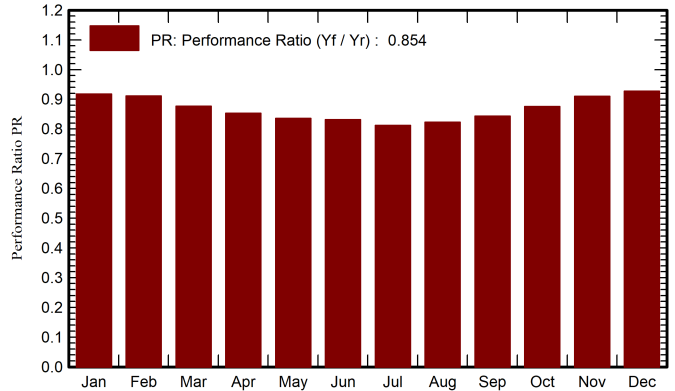
Performance Ratio PR

85.39 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

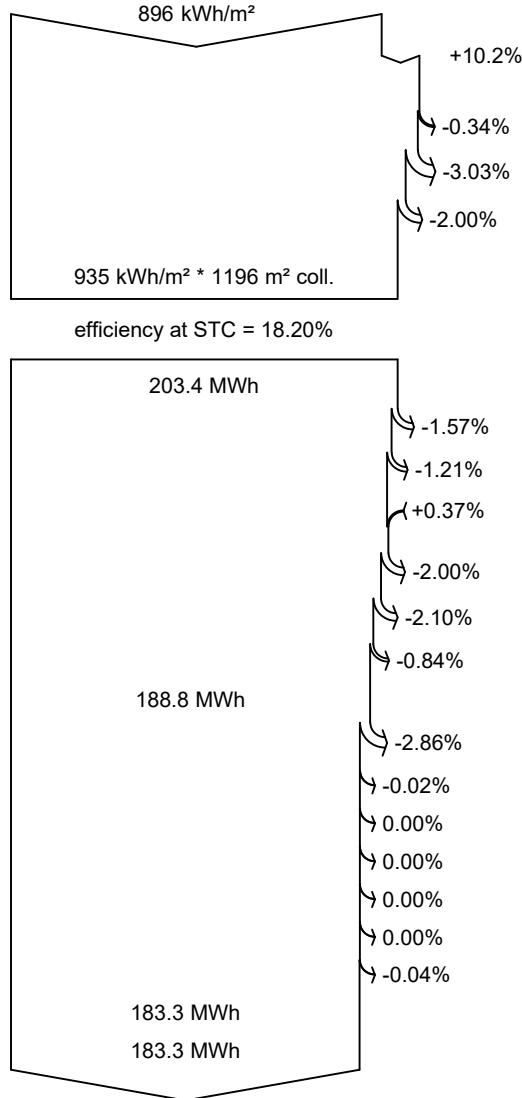
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	5.7	3.87	-1.14	26.3	25.6	5.42	5.26	0.918
February	22.8	11.62	-1.05	72.3	70.0	14.73	14.35	0.912
March	66.6	26.82	0.83	137.4	131.8	26.97	26.23	0.877
April	111.5	43.34	5.21	143.8	136.0	27.46	26.69	0.853
May	151.0	68.16	9.52	112.9	105.1	21.17	20.54	0.836
June	159.3	83.58	12.30	101.3	94.2	18.92	18.35	0.832
July	154.9	68.64	15.69	106.5	99.2	19.43	18.83	0.812
August	116.1	59.18	14.92	99.2	92.9	18.30	17.76	0.823
September	67.7	32.92	10.95	88.6	84.5	16.74	16.25	0.843
October	29.7	18.17	6.15	58.4	56.4	11.47	11.14	0.876
November	8.0	5.29	2.17	27.2	26.5	5.55	5.38	0.910
December	2.3	1.82	-0.41	12.7	12.3	2.64	2.56	0.927
Year	895.5	423.43	6.31	986.7	934.5	188.81	183.34	0.854

Legends

- GlobHor Global horizontal irradiation
- DiffHor Horizontal diffuse irradiation
- T_Amb Ambient Temperature
- GlobInc Global incident in coll. plane
- GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
- EArray Effective energy at the output of the array
- E_Grid Energy injected into grid
- PR Performance Ratio



Loss diagram



Global horizontal irradiation

Global incident in coll. plane

Near Shadings: irradiance loss

IAM factor on global

Soiling loss factor

Effective irradiation on collectors

PV conversion

Array nominal energy (at STC effic.)

PV loss due to irradiance level

PV loss due to temperature

Module quality loss

LID - Light induced degradation

Mismatch loss, modules and strings

Ohmic wiring loss

Array virtual energy at MPP

Inverter Loss during operation (efficiency)

Inverter Loss over nominal inv. power

Inverter Loss due to max. input current

Inverter Loss over nominal inv. voltage

Inverter Loss due to power threshold

Inverter Loss due to voltage threshold

Night consumption

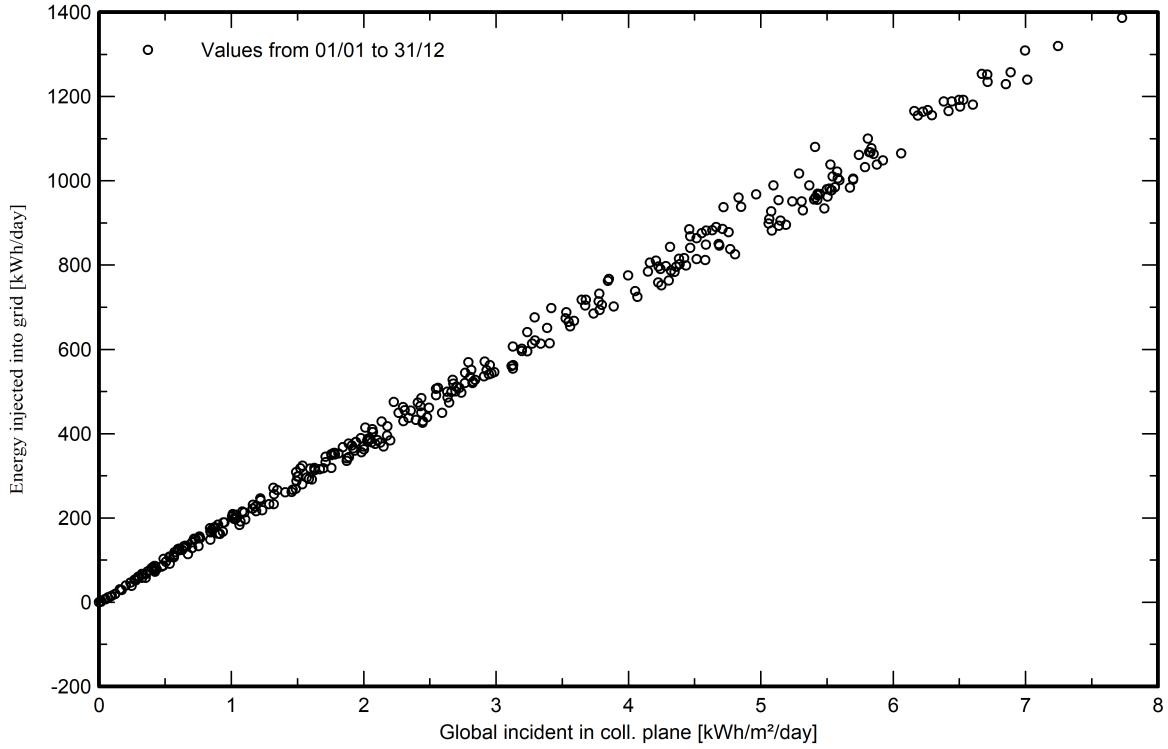
Available Energy at Inverter Output

Energy injected into grid

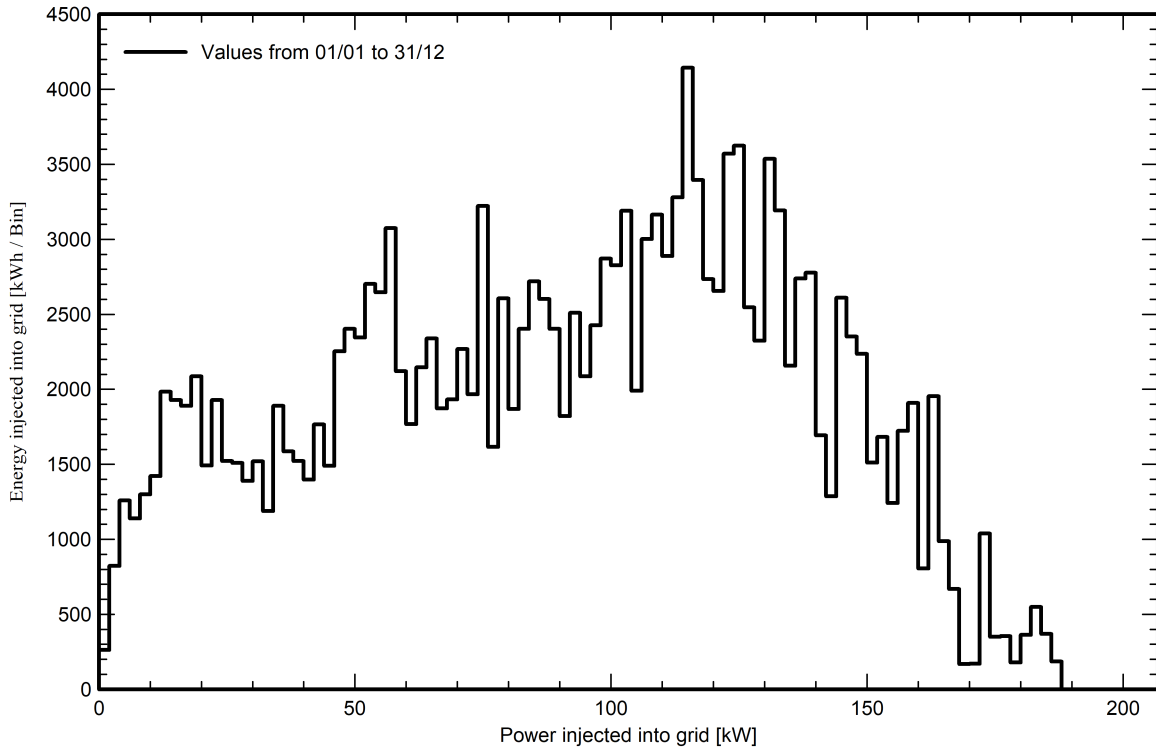


Special graphs

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution



PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: bachelorprosjekt_pyceso_trondheim

Variant: west facade

Sheds on ground

System power: 218 kWp

Nidarvoll - Norway



PVsyst V7.2.12

VC3, Simulation date:
14/03/22 14:52
with v7.2.12

Multiconsult (Norway)

Project summary

Geographical Site

Nidarvoll
Norway

Situation

Latitude 63.40 °N
Longitude 10.40 °E
Altitude 32 m
Time zone UTC+1

Meteo data

Nidarvoll
Meteonorm 8.0 (1991-2013) - Synthetic

Monthly albedo values

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Albedo	0.80	0.80	0.80	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.70

System summary

Grid-Connected System

PV Field Orientation

Fixed plane
Tilt/Azimuth 90 / 107 °

Sheds on ground

Near Shadings

Linear shadings

User's needs

Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules 640 units
Pnom total 218 kWp

Inverters

Nb. of units 3 units
Pnom total 188 kWac
Pnom ratio 1.161

Results summary

Produced Energy 120.7 MWh/year Specific production 555 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 84.83 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Near shading definition - Iso-shadings diagram	4
Main results	5
Loss diagram	6
Special graphs	7



PVsyst V7.2.12

VC3, Simulation date:
14/03/22 14:52
with v7.2.12

Multiconsult (Norway)

General parameters

Grid-Connected System		Sheds on ground			
PV Field Orientation		Sheds configuration		Models used	
Orientation				Transposition Perez	
Fixed plane				Diffuse Perez, Meteonorm	
Tilt/Azimuth 90 / 107 °				Circumsolar separate	
Horizon		Near Shadings		User's needs	
Free Horizon		Linear shadings		Unlimited load (grid)	

PV Array Characteristics

PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	SMA
Model	Mono 340 Wp Twin 120 half-cells (Original PVsyst database)	Model	Sunny Tripower STP62-US-41-Core1 (Original PVsyst database)
Unit Nom. Power	340 Wp	Unit Nom. Power	62.5 kWac
Number of PV modules	640 units	Number of inverters	3 units
Nominal (STC)	218 kWp	Total power	188 kWac
Modules	32 Strings x 20 In series	Operating voltage	150-800 V
At operating cond. (50°C)		Pnom ratio (DC:AC)	1.16
Pmpp	196 kWp		
U mpp	596 V		
I mpp	328 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	218 kWp	Total power	188 kWac
Total	640 modules	Number of inverters	3 units
Module area	1196 m ²	Pnom ratio	1.16
Cell area	1060 m ²		

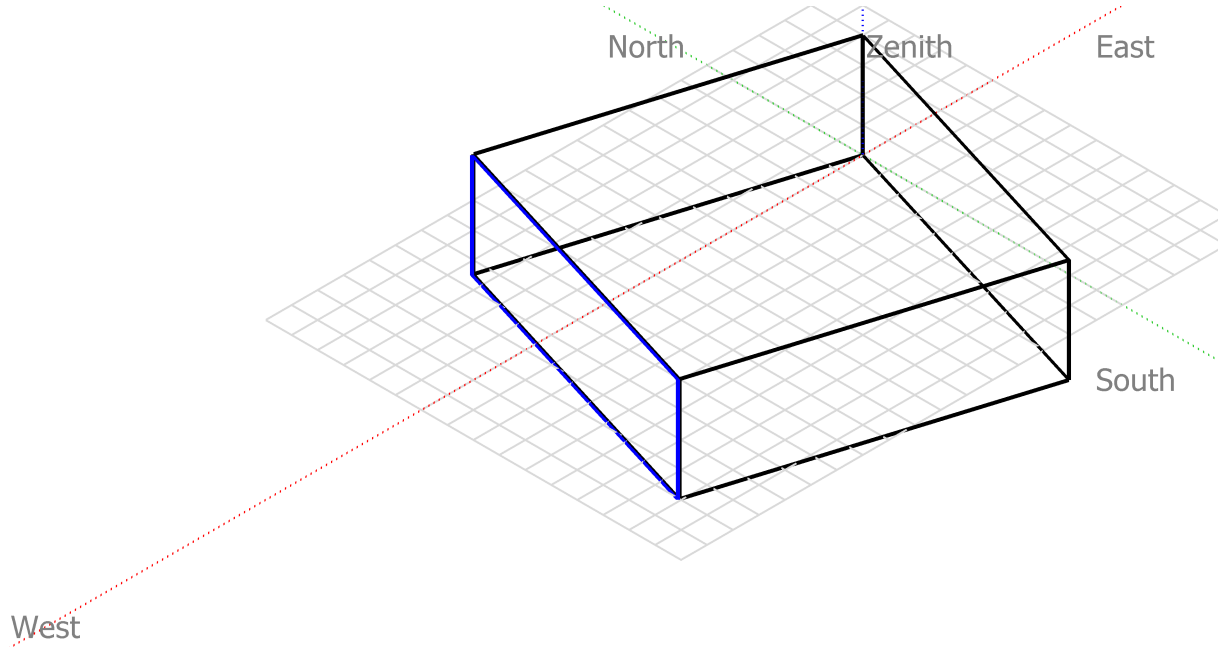
Array losses

Array Soiling Losses		Thermal Loss factor		DC wiring losses				
Loss Fraction	2.0 %	Module temperature according to irradiance		Global array res.	31 mΩ			
		Uc (const)	20.0 W/m ² K	Loss Fraction	1.5 % at STC			
		Uv (wind)	0.0 W/m ² K/m/s					
Serie Diode Loss		LID - Light Induced Degradation		Module Quality Loss				
Voltage drop	0.7 V	Loss Fraction	2.0 %	Loss Fraction	-0.4 %			
Loss Fraction	0.1 % at STC							
Module mismatch losses		Strings Mismatch loss						
Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.1 %					
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



Near shadings parameter

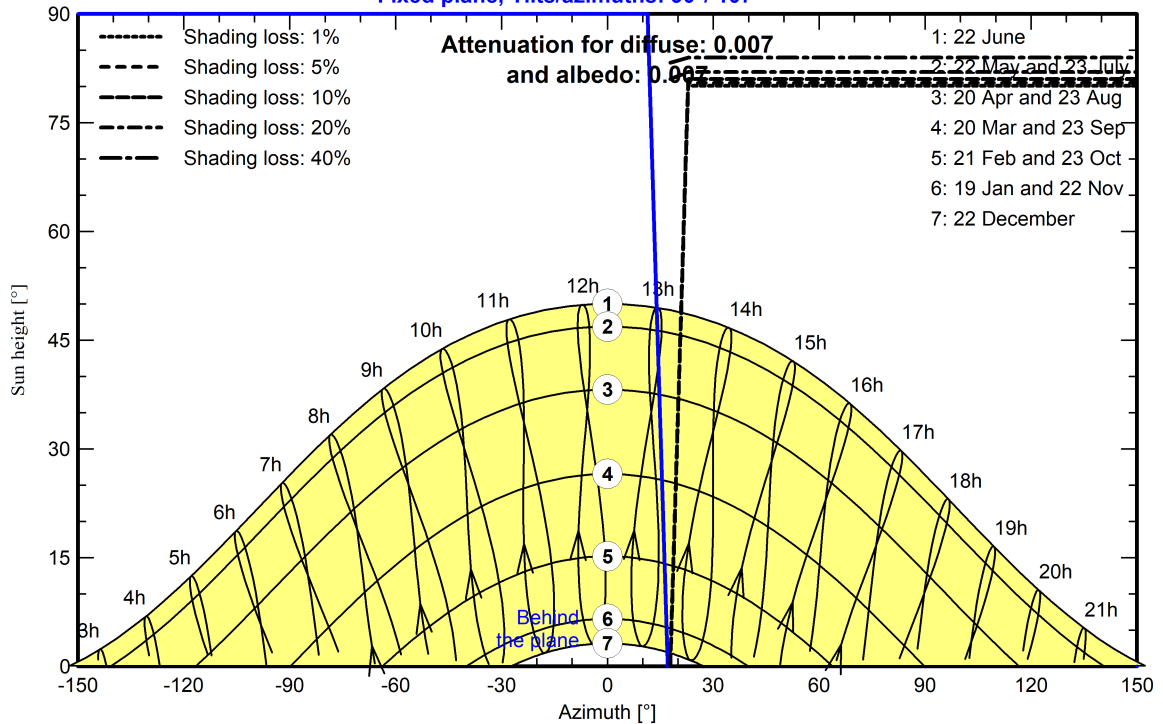
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1

Fixed plane, Tilts/azimuths: 90°/ 107°





Main results

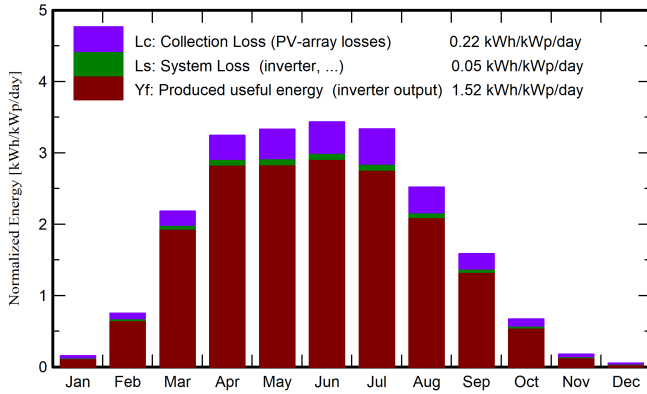
System Production

Produced Energy 120.7 MWh/year

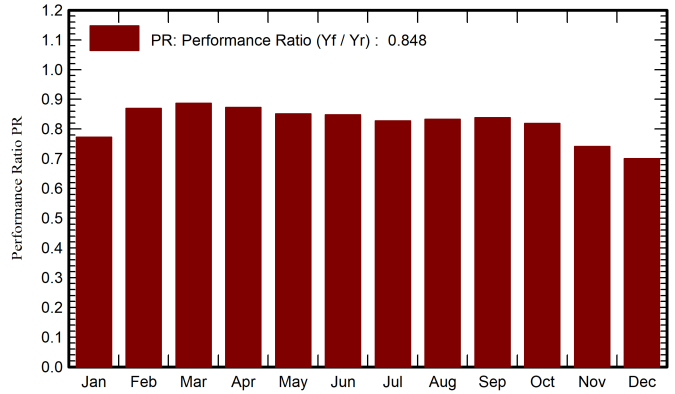
Specific production
Performance Ratio PR

555 kWh/kWp/year
84.83 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

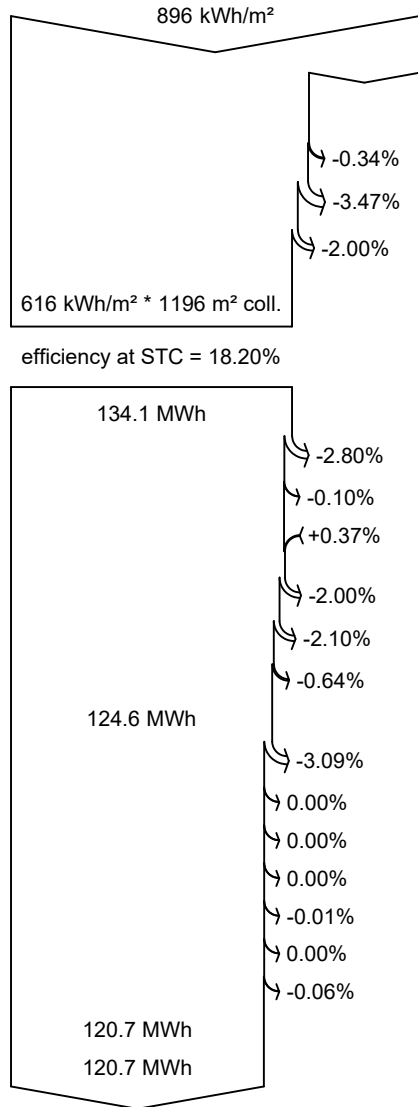
	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	MWh	MWh	ratio
January	5.7	3.87	-1.14	4.7	4.29	0.88	0.79	0.772
February	22.8	11.62	-1.05	21.0	19.40	4.13	3.98	0.870
March	66.6	26.82	0.83	67.7	63.70	13.43	13.06	0.887
April	111.5	43.34	5.21	97.3	91.97	19.01	18.49	0.873
May	151.0	68.16	9.52	103.3	97.90	19.71	19.13	0.851
June	159.3	83.58	12.30	103.0	97.58	19.58	19.01	0.848
July	154.9	68.64	15.69	103.4	98.07	19.21	18.62	0.827
August	116.1	59.18	14.92	78.0	73.82	14.60	14.14	0.833
September	67.7	32.92	10.95	47.6	44.58	8.97	8.67	0.838
October	29.7	18.17	6.15	20.8	18.98	3.88	3.70	0.818
November	8.0	5.29	2.17	5.4	4.66	0.95	0.87	0.741
December	2.3	1.82	-0.41	1.5	1.43	0.28	0.24	0.701
Year	895.5	423.43	6.31	653.8	616.37	124.62	120.69	0.848

Legends

- GlobHor Global horizontal irradiation
- DiffHor Horizontal diffuse irradiation
- T_Amb Ambient Temperature
- GlobInc Global incident in coll. plane
- GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
- EArray Effective energy at the output of the array
- E_Grid Energy injected into grid
- PR Performance Ratio



Loss diagram



Global horizontal irradiation

-27.00% Global incident in coll. plane

- Near Shadings: irradiance loss
- IAM factor on global
- Soiling loss factor

Effective irradiation on collectors

PV conversion

Array nominal energy (at STC effic.)

- PV loss due to irradiance level
- PV loss due to temperature
- Module quality loss

LID - Light induced degradation

Mismatch loss, modules and strings

Ohmic wiring loss

Array virtual energy at MPP

- Inverter Loss during operation (efficiency)
- Inverter Loss over nominal inv. power
- Inverter Loss due to max. input current
- Inverter Loss over nominal inv. voltage
- Inverter Loss due to power threshold
- Inverter Loss due to voltage threshold
- Night consumption

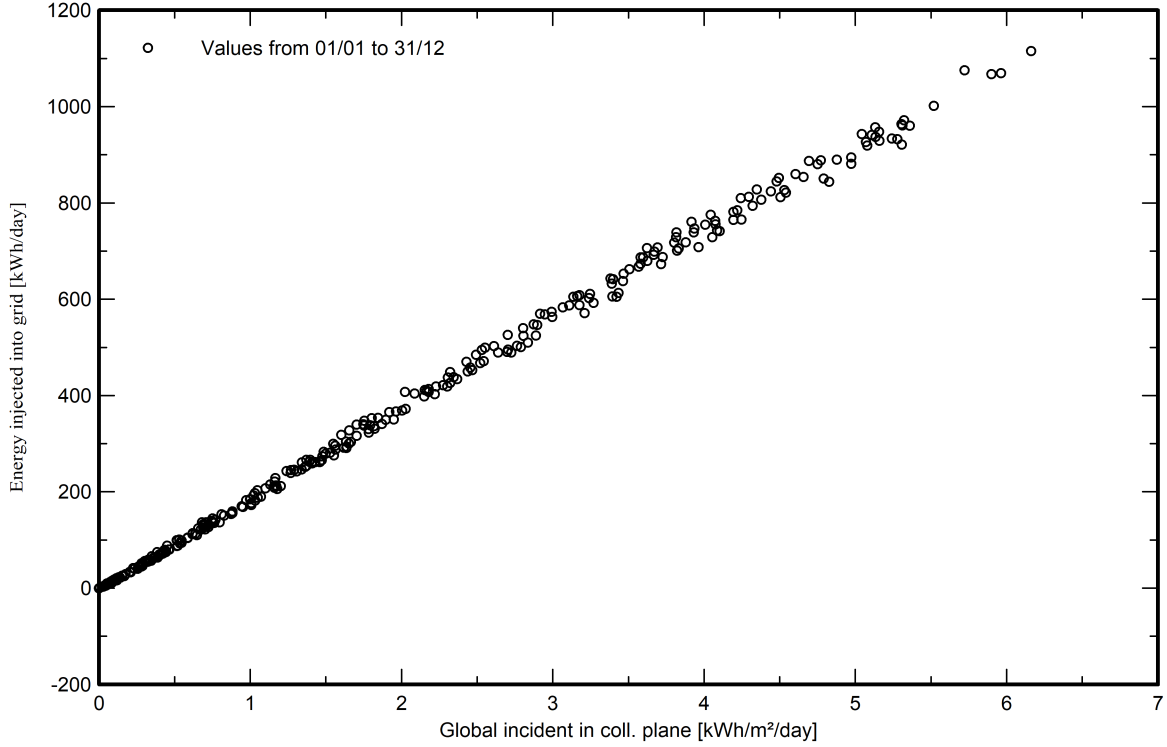
Available Energy at Inverter Output

Energy injected into grid



Special graphs

Daily Input/Output diagram



System Output Power Distribution

