

KANDIDAT NR.

GRADERING: Åpen

**Institutt for bygg- og energiteknikk — Energi og miljø i bygg**

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Webside: [www.oslomet.no](http://www.oslomet.no)

# MASTEROPPGAVE

<b>MASTEROPPGAVENS TITTEL:</b> <b>Multi-objektiv optimalisering av et kontorbygg - Klimaskjerm og settpunkt til ventilasjonsenhet</b>	<b>DATO:</b> 9.06.2021
	<b>ANTALL SIDER OG VEDLEGG:</b> 66/7
<b>FORFATTER:</b> Odd Austin Fauske	<b>VEILEDER:</b> Habtamu Bayera Madessa (OsloMet) Mehrdad Rabani (OsloMet)

**KORT SAMMENDRAG:**  
 Studiet tar for seg en multi-objektiv optimalisering av et kontorbygg for å redusere dets livssyklus-kostnader (LCC) og livssyklus-karbonfotavtrykk (LCCf). Dette blir gjort ved å modellere et referansebygg i henhold til TEK 17 i simuleringstøytet IDA-ICE. For å kunne videre optimalisere parametere til klimaskjermen og settpunkt temperaturen for ventilasjonsenheten med optimaliseringsprogrammet GenOpt. Studiet undersøker ulike vektlegging mellom byggets kostnader og CO<sub>2</sub>-utslipp. Resultatene viste at vektleggingen ville kunne påvirke hvilken løsning som var optimal, men at alle løsningene ville redusere byggets livssyklus-kostnader og livssyklus-karbonfotavtrykk betydelig. Studiet undersøkte også dagslysforholdene før og etter tiltak for å vurdere påvirkningen av å bytte vinduer. Det har blitt foreslått en metode for bygg å kunne renovere optimalt og hvor både kostnader og CO<sub>2</sub>-utslipp har blitt minimalisert.

<b>NØKKELOD:</b>
Multi-objektiv optimalisering
Livssyklus-kostnader (LCC)
Livssyklus-karbonfotavtrykk (LCCf)



## Prosjekt beskrivelse

I samarbeid mellom student og veiledere har det blitt avtalt hva prosjektet skal oppnå og inkludere. Dette er oppsummert i punktene under, som gir en beskrivelse av oppgaven.

- Litteraturstudie av de viktigste temaene, som inkluderer bygnings energiforbruk og CO<sub>2</sub>-utslipp, optimalisering av bygninger, multi-objektiv optimaliseringsmetoder og verktøy.
- Forstå IDA-ICE programmet og dets mulige tillegg for multi-objektiv optimalisering. Forstå GenOpt.
- Utvikle en referanse modell i IDA-ICE i henhold til TEK 17.
- Simulere, optimalisere og analysere resultater.
- Skrive masteroppgaven.

## Forord

Denne masteroppgaven er gjennomført våren 2021 ved fakultet teknologi, kunst og design til Oslo Metropolitan University og markerer slutten av mitt masterstudium i «Energi og Miljø i bygg»

Oppgaven sitt tema og formål er utarbeidet av doktorgrad stipendiat Mehrdad Rabani (OsloMet-Storbyuniversitet) og førsteamanuensis Habtamu Bayera Madessa (OsloMet-Storbyuniversitet). Prosjektet ble til ved at det ble funnet behov for forskning knyttet til ny optimaliseringsmetode, for blant annet å kunne møte dagens klimautfordringer. Hensikten med prosjektet er å foreslå en simulerings og optimaliseringsmetode for å minimalisere livssykluskostnader (LCC) og livssykluskarbonfotavtrykk (LCCf) til et kontorbygg lokalisert i Oslo. Metodikken for studiet er tilpasset tidligere forskning etter utført litteraturstudie. Hvor kjente simuleringsprogrammer i kombinasjon med grafisk skript for definering av objektivene til optimalisering er benyttet.

Jeg har lyst til å rette en stor takk til mine veiledere Mehrdad Rabani og Habtamu Bayera Madessa. For å hjelpe meg med etablering av metode for studiet og underveis svare på både gode og dårlige spørsmål. Hvor også veiledning har foregått sent i helger og utenfor vanlig arbeidstid. I tillegg for lån av PC og for et stort bidrag av faglig kompetanse til oppgaven.

Jeg vil takke mamma og pappa for å være viktige støttespillere og for å ta stilling til mine utfordringer under studiet. Vil også rette en stor takk til min bror for teknisk hjelp med oppgaven og gode råd ved skriving. I tillegg min søster for underveis gi meg viktig motivasjon.

Til slutt vil jeg også rette en stor takk til venner og medstudenter for faglige diskusjoner og for å gi meg fine to år ved OsloMet.

Oslo, 9. Juni 2021



Odd Austin Fauske

## Sammendrag

I dette studiet har det blitt gjennomført en multi-objektiv optimalisering av parametere til klimaskjermen og settpunkt temperaturer til ventilasjonsenheten for et kontorbygg lokalisert i Oslo. Hensikten med optimaliseringen var å identifisere de optimale løsningene for reovering av bygget slik at både livssyklus kostnaden (LCC) og livssyklus karbonfotavtrykket (LCCf) ble minimalisert. For å kunne etablere en egnet metode for studiet ble det gjennomført en bred og grundig litteraturstudie, som var en viktig del av forarbeidet. Metoden for forskningen var å først modellere referansebygget i henhold til TEK 17 og så gjennomføre en dynamisk energisimulering av bygget. Dette ble gjort i simuleringsverktøyet IDA-ICE og hvor modellen skulle videre optimaliseres med verktøyet GenOpt. For å kunne definere parametere for optimalisering og deres kostnader og utslipp ble det utviklet et grafisk skript. I dette grafiske skriptet ble det også satt krav til termisk komfort og energibruk. Kravene var PPD verdi  $<15\%$ , Top  $> 26^{\circ}\text{C}$  ikke i over 50 timer og energibruk  $<115\text{kWh}/\text{m}^2\text{år}$ . Hvis ett av kravene ikke ble møtt ville det resultere i et ugyldig resultat. Siden GenOpt optimaliserer for bare et objektiv ble det i det grafiske skriptet benyttet en «vektet summetode» for å håndtere både LCC og LCCf.

Ved optimaliseringsprosessen ble det satt opp ulike scenarioer, hvor tre ulike scenarioer skulle skille mellom lik og ulik vektning av kostnad og  $\text{CO}_2$ -utslipp. På denne måten vil man kunne finne hvilken løsning som vil resultere i det mest lønnsomme eller miljøvennlige tiltaket. Resultatene fra optimaliseringen viste ulike kombinasjoner av bygningsparametere for de optimale løsningene i hvert scenario. Som også ville føre til forskjellig kostnadsbesparelser og reduksjon av  $\text{CO}_2$ -utslipp. Hovedfunnene i studiet var at ved lik vektning og miljø vektet optimalisering ville resultatet bare ha en forskjell på  $2\text{ kr}/\text{m}^2$  og  $0,1\text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ . Men ved kostnadsvektning ville føre til en enda større besparelse på  $818\text{kr}/\text{m}^2$ , men også mindre reduksjon av  $\text{CO}_2$ -utslipp på  $31,2\text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ . Alle de optimale løsningene ville føre til et betydelig redusert energibruk. Hvor løsningene for lik og miljø vektet scenario vil kunne tilfredsstillere beregnet oppvarming og kjølekrav stilt til et passivhus. Det ble videre undersøkt om løsningene vil kunne gi gode dagslysforhold i bygget. Resultatene viste at det vil kunne være behov å benytte vinduer som har bedre lystransmisjon og at dagslysfaktor burde være en begrensning i det grafiske skriptet ved optimalisering. Studiet har foreslått en metode for multi-objektiv optimalisering av et kontorbygg og identifisert de optimale løsningene for å gjøre bygget mer besparende og miljøvennlig.

## Abstract

In this study there has been performed a multi-objective optimization of parameters to the building envelope and ventilation setpoint temperatures to an office building located in Oslo. The purpose of the optimization is to identify the optimal retrofitting measures of the reference building where lifecycle cost (LCC) and lifecycle carbon footprint (LCCf) is minimalized. To establish a suitable method a wide and thoroughly literature study was carried out, which was an important part of the preparation. The methodology began with modelling the reference building according to TEK 17 and then perform a dynamic energy simulation. This was executed with the use of IDA-ICE and where the model was further optimized with GenOpt. To be able to define parameters for optimization and there corresponding cost and emission a graphical script was developed. In the script it was established demands to thermal comfort and energy use. The demands where PPD value  $< 15\%$ , Top  $> 26^{\circ}\text{C}$  not more than 50 hours and energy use  $< 115\text{kWh}/\text{m}^2\text{year}$ . If one of the demands was not met the result would be invalidated. Since GenOpt only optimize for single objectives, it was made use of a “weighted sum approach” in the graphical script to cope with both LCC and LCCf.

In the optimization process it was formed three scenarios, which should distinguish cost and CO<sub>2</sub>-emission differently with the use of different weights. Thus, be able to find which solution that gives the most profitable and environmentally friendly retrofitting measure. The results from the optimization gave different combinations of building envelope parameters for the optimal solutions in each scenario. This will result in different amount of cost savings and reduction of CO<sub>2</sub>-emission. The main findings of the study were that with equal and environment weighted optimization the difference in results would be only 2 NOK/m<sup>2</sup> and 0,1 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. But with cost weighted optimization the cost savings would be even greater at 818 NOK/m<sup>2</sup>, but also have a lower reduction of CO<sub>2</sub>-emission at 31,2 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. All the optimal solutions led to a remarkable reduction of energy use. Where the optimal solutions for the even and environmentally weighted scenarios would satisfy the calculated heating and cooling demand according to the Passive house standard. It was further investigated if the optimal solutions would give good daylight conditions in the building. The results of the daylight simulation indicated that there was a need of windows with improved solar transmittance. Therefore, it is suggested to add the result of the daylight simulation as a constrain in the graphical script. The study has suggested a methodology for multi-objective optimization of an office building and identified the optimal solutions to make the building more cost efficient and environmentally friendly.

# Innhold

Prosjekt beskrivelse .....	iii
Forord.....	iv
Sammendrag .....	v
Abstract .....	vi
Innhold .....	vii
Figurliste.....	x
Tabelliste .....	xi
1 Bakgrunn.....	1
1.1 Innledning .....	2
1.2 Mål for oppgaven.....	3
1.3 Tidligere forskning - Litteraturstudie .....	3
1.3.1 Bygnings klimaskjerm og settpunkt for HVAC.....	3
1.3.2 Livssyklus vurdering - LCC og LCCf .....	5
1.3.3 Bygningsenergi- og optimaliseringsverktøy.....	6
1.4 Begrensinger .....	6
2 Teori .....	8
2.1 Standarder og forskrifter.....	8
2.1.1 TEK - Byggteknisk forskrift med veiledning .....	8
2.1.2 NS 3701 - Passivhusstandard for yrkesbygg .....	9
2.1.3 NS 3031:2014 - Bygningers energiytelse .....	9
2.1.4 NS-EN 15251:2007 - Inneklimastandarden .....	10
2.1.5 NS-EN 3720:2018 - Metode for klimagassberegning .....	10
2.1.6 NS 3454:2013 - Livssyklus kostnader for byggverk - Prinsipper og klassifikasjon .....	10
2.1.7 Arbeidstilsynets veiledning 444 - Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen .....	10
2.2 Klimadata.....	10
2.3 Norsk Prisbok.....	11
2.4 Byggforskerien.....	11
2.5 Simuleringsverktøy .....	11
2.5.1 IDA-ICE.....	12
2.5.2 EnergyPlus .....	12
2.5.3 SIMIEN.....	13
2.5.4 TRNSYS .....	13
2.5.5 Sammenligning av simuleringsverktøy.....	13
2.6 Optimaliseringsverktøy .....	13
2.6.1 GenOpt.....	14
2.6.2 MOBO .....	14
2.6.3 Opt-E-Plus.....	14
2.6.4 Sammenligning av optimaliseringsverktøy .....	15
2.7 Prosessbeskrivelse av IDA-ICE og GenOpt .....	15

2.8	Livssyklus kostnad (LCC) og Livssyklus karbonfotavtrykk (LCCf).....	17
3	Metode.....	18
3.1	Forarbeid.....	18
3.2	Referansebygg.....	18
3.2.1	Inndeling av soner.....	19
3.2.2	Oppvarming og kjøling.....	20
3.2.3	Solskjerming.....	20
3.2.4	Kritisk rom.....	20
3.2.5	Dagslys.....	21
3.3	Simulering- og optimaliseringsverktøy.....	21
3.4	Definering av inndata for simuleringmodell.....	21
3.4.1	Konstruksjon.....	21
3.4.2	Klimadata og lokasjon.....	22
3.4.3	Solskjerming.....	22
3.4.4	Settpunktverdier for soner.....	23
3.4.5	Internlaster.....	23
3.4.6	Driftstider og tilstedeværelse.....	24
3.4.7	Ventilasjon.....	24
3.4.8	Oppvarming og kjøling.....	25
3.5	Optimaliseringsprosess.....	26
3.5.1	Ulike scenarioer.....	26
3.5.2	Generering av bygningsmodell.....	27
3.5.3	Definering av inndata for optimalisering.....	27
3.5.4	Begrensninger - Energibruk og termisk komfort.....	28
3.5.5	GenOpt.....	29
3.5.6	LCC.....	30
3.5.7	LCCF.....	32
3.5.8	Vektet summetode.....	33
3.5.9	Grafisk skript.....	34
3.6	Evaluering av metode.....	40
4	Resultater og Diskusjon.....	41
4.1	Energibruk av referansebygg.....	41
4.2	Optimaliseringsresultater.....	43
4.2.1	Begrensninger og konvergens.....	43
4.2.2	Optimale løsninger.....	44
4.2.3	Energibruk og temperatur.....	51
4.3	Dagslys.....	57
4.3.1	Referanse bygning.....	57
4.3.2	Scenario 1.....	57
4.3.3	Scenario 2.....	58
4.3.4	Scenario 3.....	58



4.3.5	Sammenligning av dagslys.....	59
4.4	LCC vurdering.....	59
4.5	LCCf vurdering .....	60
4.6	Multi-objektiv vurdering .....	61
5	Konklusjon .....	62
6	Referanser .....	63
VEDLEGG	.....	1
	Vedlegg A Plantegninger av referansebygg.....	1
	Vedlegg B Kostnader, CO <sub>2</sub> verdier og beregninger.....	2
	Vedlegg C Grafer for tilstedeværelse, belysning og utstyr.....	5
	Vedlegg D Ventilasjonsaggregat .....	6
	Vedlegg E Oppvarming og kjølesystem bygningsnivå .....	7
	Vedlegg F Resultater Dagslys .....	8
	Vedlegg G Grafisk skript.....	11

## Figurliste

Figur 1 Månedlig oversikt over tørrkuletemperatur Oslo .....	11
Figur 2 Sammenligning av simuleringsverktøy .....	13
Figur 3 Sammenligning av optimaliseringsverktøy .....	15
Figur 4 Prosessbeskrivelse av IDA-ICE og GenOpt .....	15
Figur 5 Metodebeskrivelse av studie .....	18
Figur 6 Utforming av referansebygget .....	19
Figur 7 Lokasjon av kritisk rom .....	21
Figur 8 Flytskjema av optimaliseringsprosessen .....	26
Figur 9 Settpunkt for ventilasjons temperatur ved optimalisering .....	28
Figur 10 Grafisk skript .....	35
Figur 11 Metode for en isolasjonstykkelse i grafisk skript .....	36
Figur 12 Metode for rivning av yttervegg i grafisk skript .....	36
Figur 13 Metode for operasjonskostnad i grafisk skript .....	37
Figur 14 Metode for CO <sub>2</sub> -utslipp av operasjon i grafisk skript .....	38
Figur 15 Metode for begrensninger i grafisk skript .....	39
Figur 16 Metode for kostnad/CO <sub>2</sub> -utslipp i grafisk skript .....	39
Figur 17 Metode for vektet summetode i grafisk skript .....	39
Figur 18 Månedlig energibruk av referansebygget .....	42
Figur 19 Månedlig temperaturer kritisk rom i referansebygget .....	42
Figur 20 Påvirkning av begrensninger og konvergens ved optimalisering .....	43
Figur 21 Globalt minimum for Scenario 1 .....	44
Figur 22 Pareto front Scenario 1 .....	44
Figur 23 Graf for optimal settpunkt temperatur for Scenario 1 .....	45
Figur 24 Globalt minimum for Scenario 2 .....	46
Figur 25 Pareto front Scenario 2 .....	46
Figur 26 Graf for optimal settpunkt temperatur for Scenario 2 .....	47
Figur 27 Globalt minimum for Scenario 3 .....	48
Figur 28 Pareto front Scenario 3 .....	48
Figur 29 Graf for optimal settpunkt temperatur for Scenario 3 .....	49
Figur 30 Sammenligning av settpunkt temperaturer for ventilasjon .....	50
Figur 31 Månedlig energibruk for Scenario 1 .....	51
Figur 32 Månedlige temperaturer kritisk rom for Scenario 1 .....	51
Figur 33 Termisk komfort og energibruk for Scenario 1 .....	52
Figur 34 Månedlig energibruk for Scenario 2 .....	52
Figur 35 Månedlige temperaturer for Scenario 2 .....	53
Figur 36 Termisk komfort og energibruk for Scenario 2 .....	53
Figur 37 Månedlig energibruk for Scenario 3 .....	54
Figur 38 Månedlige temperaturer for Scenario 3 .....	54
Figur 39 Termisk komfort og energibruk for Scenario 3 .....	55
Figur 40 Sammenligning av energibruk .....	56
Figur 41 Sammenligning av temperaturer .....	56
Figur 42 Dagslysforhold 2. etasje Referanse bygning før tiltak .....	57
Figur 43 Dagslysforhold 2. etasje Referanse bygning etter tiltak Scenario 1 .....	57
Figur 44 Dagslysforhold 2. etasje Referanse bygning etter tiltak Scenario 2 .....	58
Figur 45 Dagslysforhold 2. etasje Referanse bygning etter tiltak Scenario 3 .....	58

## Tabelliste

Tabell 1 Oversikt over relevante studier.....	3
Tabell 2 Sammenligning av verdier fra TEK 17 og NS:3701.....	8
Tabell 3 Generell bygningsinformasjon .....	19
Tabell 4 Kjøle- og oppvarmingsbehov for referansebygget.....	20
Tabell 5 Inndata for konstruksjonen til simuleringsmodell.....	22
Tabell 6 Settpunkt for soner .....	23
Tabell 7 Internlaster for referansebygget.....	23
Tabell 8 Driftstider for referansebygget .....	24
Tabell 9 Luftmengder for referansebygget.....	24
Tabell 10 Parametere for optimalisering og definering av variasjonsområde .....	27
Tabell 11 Verdier til algoritme parametere .....	29
Tabell 12 Innputtverdier for LCC-beregning.....	31
Tabell 13 Energibruk av referansebygning .....	41
Tabell 14 Optimale løsninger Scenario 1 .....	45
Tabell 15 Optimale løsninger Scenario 2 .....	47
Tabell 16 Optimale løsninger Scenario 3 .....	49
Tabell 17 Sammenligning av optimale løsninger .....	50
Tabell 18 Energibruk av optimale løsninger .....	55
Tabell 19 Sammenligning av LCC resultater .....	60
Tabell 20 Sammenligning av LCCf resultater .....	60
Tabell 21 Total multi-objektiv vurdering .....	61

## 1 Bakgrunn

Ved prosjektering av nye bygg og renovering av eksisterende bygg har viktigheten av kostander og CO<sub>2</sub>-utslipp alltid vært stor. Behovet for å identifisere de gunstigste designløsningene er fortsatt økende i bransjen, grunnet strengere krav til blant annet energibruk og termisk komfort. Metoden for å oppnå dette har vært i stadig utvikling og nye programmer åpner for nye muligheter og forenklinger. For at bransjen skal kunne benytte seg av effektive metoder er det viktig at disse programmene er godt testet og vist hvordan kan brukes på innovative måter. Dette kan føre til en forbedring av brukte metoder og gjøre det enklere å oppnå mål som redusert energibruk. Samtidig har et generelt økt energiforbruk i samfunnet ført til at energiforsyning må bli brukt med minst mulig tap. For å minimalisere dette tapet er det nødvendig å bygge energieffektivt, men også kunne ta stilling til kostnaden.

I en byggefase er det mange parametere som det skal tas hensyn til og ofte er de motstridende. Dette kan for eksempel være at å bygge bærekraftig vil være kostbart eller å bygge lønnsomt vil kunne føre til et dårligere innneklima. Derfor vil det være nødvendig å utvikle metoder som kan ta hensyn til flere parametere og ha mulighet til å påvirke vektleggingen imellom dem. I bygningssektoren er dette en utfordring og forskning som kan forenkle problemstillingen vil være nyttig. Samtidig burde metoden være brukervennlig og egnet for å kunne brukes tverrfaglig i et bygningsprosjekt. I tillegg er det behov i bransjen for metodikker som er tidsbesparende og automatiserte. Den foreslåtte optimaliseringsprosessen i dette studiet vil være akkurat det.

I dette studiet blir en energisimuleringsmodell av et kontorbygg lokalisert i Oslo, som tilfredsstillende TEK 17 utviklet og brukt som referansebygg. Bygget skal renoveres, etter behov for en forbedring av klimaskjerm og settpunkt for ventilasjon. For å identifisere de optimale bygningsdesignløsningene, blir energisimuleringsprogrammet IDA-ICE benyttet med optimaliseringsverktøyet GenOpt. Simuleringsprogrammet vil sette opp en matrise av innputtene for optimalisering og teste over  $8,3 \cdot 10^7$  antall mulige kombinasjoner. Innputtene er knyttet til ulike isolasjonstykkelser, typer vinduer og settpunkt temperaturer for ventilasjonen. Ved vurdering av de ulike bygningsdesignløsningene vil man oppnå en minimalisering av livssyklus kostnader (LCC) og karbonfotavtrykket (LCCf). Hvor de foreslåtte løsningene ikke skal bryte definerte energikrav og termisk komfort anbefalinger.

## 1.1 Innledning

Bygninger står for en stor del av den totale energibruken i verden og bidrar betydelig til den globale oppvarmingen. For land i EU står bygnings og konstruksjonssektoren for nærmere 40% av den totale energibruken [1]. I tillegg er 38% av verdens CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til denne sektoren sin verdikjede. Derfor kreves det fortsatt studier knyttet til energieffektive løsninger og bidrag til bærekraftig utvikling. På denne måten kan energiforbruket og CO<sub>2</sub> utslippet i sektoren reduseres.

Situasjonen i Norge er tilnærmet lik, hvor omtrent 40% av energibruken tilhører bygg. Derimot er bygninger i Norge, sett i internasjonal sammenheng, av rimelig god energimessig standard. Hvor om lag 70-75% av energibruken kommer fra fornybar energi [2]. Denne fornybare energien består i stor grad av elektrisitet fra vannkraft. Dette blir det tatt hensyn til ved vurdering av CO<sub>2</sub>-utslippet fra elektrisitet i studiet, men det er fortsatt nødvendig å øke bruken av fornybare energikilder i sektoren.

En annen viktig interesse i sektoren er knyttet til kostnader ved valg av bygningsdesign løsninger. Hvor man ønsker mulighet for vurdering av lønnsomhet og mulige besparelser for hele byggets levetid. Ved prosjektering av bygg kan investeringskostnaden av energieffektive bygg være stor, men hvis man tar hensyn til det reduserte energibruken over en lengre periode kan løsningen bli gunstig. Derfor er det viktig å kunne gjennomføre beregninger som kan vurdere om når et tiltak vil bli lønnsomt. Kostnader relatert til energibruk er store og studier viser at besparingsmulighetene fortsatt er betydelige [3].

For å imøtekomme problemstillingen knyttet til å kunne prosjektere miljøvennlig og lønnsomt er det behov for studier som foreslår metodikk som kan forenkle dette. Hensikten med studiet er å foreslå en slik metode og vise hvordan allerede brukte verktøy kan benyttes på en innovativ måte. I dette studiet er det å kombinere mulighetene med dynamiske bygningsenergi- og optimaliseringsverktøy for å minimalisere kostnadene og CO<sub>2</sub>-utslippet til ulike designløsninger. Siden klimaskjerm og valg av konstruksjonsmaterialer har en stor påvirkning på et byggs energibruk er det lagt fokus på å optimalisere dette i studiet. I tillegg vil operasjonskostnader og termisk komfort være avhengig av disse valgene ved prosjektering. Målet med studiet er å identifisere hvilken kombinasjon av designløsningene for klimaskjermen og ventilasjon som gir lavest kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. Metodikken for å oppnå dette målet er basert på det gjennomførte litteraturstudiet, hvor ulike metoder og resultater er evaluert. Oppgaven vil ha en videre struktur av å presentere mål og tidligere forskning, teori, metode, resultater og diskusjon og konklusjon av studiet.

## 1.2 Mål for oppgaven

Målene med oppgaven er oppsummert i punktene under og er også nevnt i innledningen.

- Utføre litteraturstudie av de viktigste temaene, inkludert energibruk og utslipp av klimagasser, effektive energibygningsløsninger, optimalisering av bygninger, multi-objektive optimaliseringsmetoder og verktøy.
- Gi forståelse av IDA-ICE programmet, og dets tilleggsmuligheter for multi-objektiv optimalisering.
- Utvikle en referansemodell i IDA-ICE i henhold til TEK 17.
- Gjennomføre energisimuleringer og optimalisere bygningsparametere for å minimalisere byggets, kostnader og CO<sub>2</sub>-utslipp. Ved å i tillegg ta hensyn til inneklimate og termisk komfort anbefalinger fra relevante standarder.

For å oppnå målene med oppgaven er ulike metoder og verktøy benyttet. Dette blir grundig beskrevet i metodekapitlet og vil være basert på tidligere forskning, som er drøftet ved utført litteraturstudie. Slik vil velkjente og godt anvendte programmer for energisimulering som IDA-ICE bli benyttet. For å så videre bli brukt i kombinasjon med optimaliseringsverktøyet GenOpt.

## 1.3 Tidligere forskning - Litteraturstudie

Til denne forskningen er det gjennomført en bred og grundig analyse av tidligere studier. Dette er forsøk og utgivelser som tar for seg temaer knyttet til optimalisering av byggets klimaskjerm, livssyklus-kostnader (LCC), livssyklus-karbonfotavtrykk (LCCf) og simuleringsverktøy. Hensikten med litteraturstudiet er å presentere anvendte metoder og gi en rettfærdiggjørelse av forskningen.

### 1.3.1 Bygnings klimaskjerm og settpunkt for HVAC

For å identifisere optimale tiltak for forbedring av bygningers energiytelse har en rekke studier foreslått ulike optimaliseringsmetoder. Dette har vært gjort ved å legge fokus på å optimalisere byggets klimaskjerm, ventilasjonssystem og settpunkt for romoppvarming og kjøling. [Tabell 1](#) presenterer metodene og parameterne brukt i tidligere studier.

*Tabell 1 Oversikt over relevante studier*

Referanse	Metode	Beskrivelse	Innputt parametere
Hamdy og Mauro [4]	IDA-ICE simuleringer i samspill med NSGA-II for optimalisering.	Multi-objektiv optimalisering av bygningsdesign for minimalisering av kostnader og klimagassutslipp.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Isolasjon tykkelse [m]</li><li>• Vindutype [-]</li><li>• Varmegjenvinnertype [-]</li><li>• Solskjerming [-]</li><li>• Infiltrasjon [1/h]</li></ul>

Niemelä et al. [5]	IDA-ICE er brukt som dynamisk simuleringstøyt med optimaliseringsverktøyet MOBO.	Multi-objektiv optimalisering av kostnader og energibruk for ulike renoveringstiltak.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• U-vegg [W/m<sup>2</sup>K]</li> <li>• U-tak [W/m<sup>2</sup>K]</li> <li>• U-gulv [W/m<sup>2</sup>K]</li> <li>• U-dør [W/m<sup>2</sup>K]</li> <li>• Vindutype [-]</li> <li>• Solskjerming [-]</li> <li>• Infiltrasjon [1/h]</li> <li>• Mekanisk tilluft/avtrekks ventilasjon</li> </ul>
Rosso et al. [6]	EnergyPlus programmet er koblet sammen med Python som bruker en egendefinert NSGA-II algoritme.	Det blir foreslått en multi-objektiv optimalisering for å minimere bygningsenergi, konstruksjon og energikostnader og CO <sub>2</sub> -utslipp.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vindutype [-]</li> <li>• Isolasjon tykkelse [m]</li> <li>• Solskjerming [-]</li> <li>• Strålingsegenskaper til etterbehandlingslag</li> </ul>
Ascione et al. [7]	EnergyPlus blir brukt som simuleringstøyt sammen med MATLAB.	Multi-objektiv optimalisering av energibruk, kostnader relatert til energibruk og timer overtemperatur for bygning lokalisert i Italia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Settpunkt temp. varme/kjøling [°C]</li> <li>• Solabsorpsjonen til utvendige overflater</li> <li>• Plassering av isolasjon</li> <li>• Isolasjonstykkelse [m]</li> <li>• Orientering av bygget</li> <li>• Vindutype [-]</li> </ul>
Bichiou og Krarti [8]	DOE-2 er benyttet i studiet for energisimulering og er brukt i kombinasjon med tre ulike optimaliseringsalgoritmer, Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Algorithm (PSO) og The Sequential Search (SS)	Single-objektiv optimalisering av energibruk eller kostnader for renoveringstiltak.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientering av bygget</li> <li>• Isolasjonstyper [-]</li> <li>• Infiltrasjon [1/h]</li> <li>• Settpunkt temp. varme/kjøling [°C]</li> <li>• Vindutype [-]</li> </ul>
Yigit og Ozorhon [9]	MATLAB er benyttet både for energisimulering og optimalisering. Hvor modell er validert mot EnergyPlus.	Multi-objektiv optimalisering av energibruk og kostnader til referansebygg lokalisert i Tyrkia. Fokus på å minimere varme og kjøle behov med kostnader som begrensinger.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegg type og tykkelse [mm]</li> <li>• Tak type og tykkelse [mm]</li> <li>• Gulv type og tykkelse [mm]</li> <li>• Vindutype og areal [m<sup>2</sup>]</li> <li>• Absorpsjonsfaktor vegg og tak</li> </ul>

Harkoussa et al. [10]	TRNSYS simuleringsverktøyet er koblet sammen med MOBO for optimalisering.	Multi-objektiv optimalisering, for å minimere varme- og strømbehov og kostnader.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Isolasjonstykkelse vegg og tak [cm]</li> <li>• Vindutype [-]</li> <li>• Settpunkt varme og kjøling [°C]</li> <li>• Vindu/vegg ratio</li> </ul>
Wang et al. [11]	EnergyPlus er koblet sammen med Python. NSGA-II er brukt for optimalisering.	Multi-objektiv optimalisering av årlig energibruk og termisk komfort til bygning lokalisert i Kina.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• U-vegg [W/m<sup>2</sup>K], tetthet [kg/m<sup>3</sup>], spes. varmekap. [J/kgK]</li> <li>• U-tak [W/m<sup>2</sup>K], tetthet [kg/m<sup>3</sup>], spes. varmekap. [J/kgK]</li> <li>• U-gulv [W/m<sup>2</sup>K]</li> <li>• U-vindu [W/m<sup>2</sup>K]</li> <li>• Infiltrasjon [1/h]</li> <li>• Orientering [°]</li> <li>• Solskjerming, høyde/dybde/bredde [m]</li> </ul>

### 1.3.2 Livssyklus vurdering - LCC og LCCf

Beregning av kostnader og klimagassutslipp har blitt i tidligere studier gjennomført med bruk av ulike metoder og verktøy. Schwartz et al. [12] presenterte metode for vurdering av både LCC og LCCf. Målet med studiet var å identifisere de optimale renoveringstiltakene med hensikt for å minimalisere disse objektivene. Livssyklus kostnader har blitt beregnet ved bruk av mange ulike formler og antagelser i tidligere forskning. Wang et al. [13] beregnet LCC ved å ta hensyn til alle kostnader knyttet til en designløsning og vurderte lønnsomheten etter nåverdi metoden. Grygierek og Ferdyn-Grygierek [14] vurderte LCC etter endringen i kostnad fra referansebygget og gjorde en grundig vurdering av investeringskostnaden til de ulike designløsningene.

Nadoushani og Akbarnezhad [15] gjennomførte en studie som viser viktigheten av å ta hensyn til livssyklus karbonfotavtrykk (LCCf) ved design av bygningsstrukturen. Hvor resultatene viste store forskjeller av klimagassutslipp til ulike bygningsstrukturer. En studie gjennomført av Beccali et al. [16] konkluderte med at lavere energibruk førte til større materialbundet utslipp. Pal et al. [17] undersøkte forskjellen av optimalisert livssyklus klimagassutslipp og bare det operative klimagassutslippet. I studiet ble det konkludert at forskjellen var relativ liten, men at tynnere isolasjon i kombinasjon med større PV-panel ville redusere det totale karbonfotavtrykket. Denne konklusjonen tyder på at mengden utslipp vil være størst ved bruksperioden av bygget.

Mukkavaara et al. [18] foreslo en metode for livssyklusvurdering av kostnader og klimagassutslipp. Studiet hadde også fokus på hvordan man skulle velge mellom løsningene som ble vurdert optimale, ved å bruke faglig kompetanse fra praktiserende brukere.



Niemelä et al. [19] gjennomførte en studie for å minimalisere beregnet LCC og CO<sub>2</sub> utslipp. Ved beregning av CO<sub>2</sub>-utslipp tok studiet bare hensyn til utslipp knyttet til energiforsyning og ikke konstruksjons materialer og transport. Hirvonen et al. [20] utførte en studie for å blant annet beregne reduksjonen av CO<sub>2</sub>-utslipp til ulike bygningskategorier i Finland. Studiet viste til et mål fra EU og Finland om å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp med 80-100% før 2050. Studiet konkluderte med at scenarioene i studiet ville kunne ha et redusert CO<sub>2</sub>-utslippet på 50-75% før 2050.

### 1.3.3 Bygningsenergi- og optimaliseringsverktøy

Det har blitt benyttet flere ulike bygningsenergi og optimaliseringsverktøy ved tidligere forskning for identifikasjon av optimale løsninger. Flere av disse er nevnt som metode i Tabell 1. De mest brukte energisimuleringsverktøyene har vært EnergyPlus, IDA-ICE og TRNSYS. For optimalisering blir disse programmene kombinert med optimaliseringsprogrammer som GenOpt [21], MOBO [22], Opt-E-Plus [23], jEPlus + EA [24], BEopt [25] og MultiOpt [26] benyttet. Tian et al. [27] gjorde en vurdering av disse optimaliseringsprogrammene og sammenlignet deres egenskaper og muligheter. Denne forskningen ble tatt i betraktning ved valg av optimaliseringsverktøy for dette studiet.

Likheten i tidligere forskning har vært bruk av energisimuleringsverktøy i samspill med en egenutviklet optimaliseringsmetode for å optimalisere ulike objektiver. Dette studiet skal bygge videre på denne forskningen og optimalisere klimaskjermen og settpunkt for ventilasjonen. Studiet skal foreslå en metode for å minimalisere livssyklus kostnadene (LCC) og karbonfotavtrykket (LCCf) til de forslåtte bygningsdesignløsningene. I tillegg skal energikrav og termisk komfort anbefalinger være tilfredsstillt. For å kunne gjennomføre dette er grafisk skript utviklet i energisimuleringsprogrammet IDA-ICE og optimalisert med GenOpt. Dette skriptet skal ikke bare vurdere kostnaden av en designløsning, men også CO<sub>2</sub>-utslippet. På denne måten tar studiet steget videre fra allerede gjort forskning [28, 29].

## 1.4 Begrensinger

Til oppgaven har det blitt gjort noen forenklinger og antagelser for å både kunne gjennomføre studiet og begrense omfanget. Det gjennomførte litteraturstudiet tar bare for seg forskning som legger vekt på optimalisering av flere objektiver som energibruk, kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. Dette er studier som benytter seg av de mest relevante verktøyene og er gjort av nasjonale og internasjonale forskere. Forskningen burde også være gjort for tilsvarende bygningskategori og størrelse. For å etablere en egnet metode for vurdering av LCC og LCCf er også studier om dette med i litteraturstudiet, selv om dette ikke er knyttet til klimaskjerm eller ventilasjon. Begrensningene til oppgaven er punktvis oppsummert under. Andre forutsetninger knyttet til LCC og LCCf beregning blir tatt for seg i metodekapitlet, men de viktigste er nevnt under.

- Det er benyttet et referansebygg i studiet hvor forskjeller mellom faktiske og simulerte verdier kan eksistere.
- Studiet er bare gjort for en lokasjon og klima, Oslo.
- Studiet benytter bare informasjon knyttet til priser og CO<sub>2</sub> utslipp fra Norsk Prisbok versjon 2017, hvor forskjeller fra dagens og faktiske verdier kan foreligge.
- Interpolering for vindus priser og utslipp.
- Studiet forutsetter årskostnaden som pris for vedlikehold.
- Studiet tar ikke hensyn til mulig ombruk av materialer.
- Antatt likt utslipp av materialer ved endt levetid.
- Isolasjonsareal tilsvarer totalt areal for vegg, tak eller gulv.

## 2 Teori

For å gi en bedre forståelse av anvendte metoder vil dette kapitlet gjennomgå bakenforliggende teori. Emnene som blir tatt for seg er standarder og forskrifter, klimadata, simulerings- og optimaliseringsverktøy benyttet i studiet. De ulike kravene og anbefalingene som er nevnt i kapitlet er parametere som skal tilfredsstilles innenfor bygningsdesign og energibruk. Kapitlet vil gi leseren bred kunnskap om temaene, slik at man får forståelse av hvorfor metoder og verktøy er valgt i studiet.

### 2.1 Standarder og forskrifter

Forskrift om tekniske krav til byggverk trekker opp grensen for minimum av egenskaper et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge [30]. Den tekniske forskriften beskriver generelle ytelses- og funksjonskrav for bygninger og setter en standard for hva kunden kan forvente. Energikravene i forskriften er fastsatt av kommunal og moderniseringsdepartementet og følger en rekke felles bestemmelser fra EU. Forskriften skal gi forutsigbare krav og blir endret ved behov for innstramning av krav.

#### 2.1.1 TEK - Byggteknisk forskrift med veiledning

Formålet til forskriften er å sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi [31]. Slik vil bygg næringen sikre energieffektive og bærekraftige bygg. Veiledningen til TEK er utgitt av Direktoratet for byggkvalitet (DiBK) og foreslår preaksepterte ytelser for å tilfredsstille funksjonskravene. Forskriften stiller krav til energieffektivitet som kan bli tilfredstilt ved enten energirammemodellen eller tiltaksmodellen. Energirammemodellen baserer seg på at bygget ikke skal overskrive et gitt netto energibehov for en definert bygningskategori. Tiltaksmodellen går utpå å tilfredsstille gitte tiltak i forskriften, knyttet til byggets klimaskjerm og energisystemer. Det kan omfordes for begge metoder og energitiltakene kan fravikes forutsatt at byggets varmetapstall ikke øker og kravene i §14-3 oppfylles. Forskriften har igjennom årene blitt revidert ved flere tilfeller og dette har blitt gjort i samsvar med behovet for mer energieffektive bygg.

Tabell 2 er en sammenligning mellom verdier fra TEK 17 og passivhusstandarden NS:3701.

Tabell 2 Sammenligning av verdier fra TEK 17 og NS:3701

Parameter	TEK 17	NS: 3701 (Passivhus)	NS: 3701 (Lavenergibygg)	Enhet [-]
Yttervegg, U-verdi	0,22	0,10-0,12	0,15-0,16	[W/m <sup>2</sup> K]
Tak, U-verdi	0,18	0,08-0,09	0,10-0,12	[W/m <sup>2</sup> K]
Gulv, U-verdi	0,18	0,08	0,10-0,12	[W/m <sup>2</sup> K]
Vindu, U-verdi	1,2	0,8	1,2	[W/m <sup>2</sup> K]
Normalisert kuldebroverdi, $\Psi'$	0,07	0,03	0,05	[W/m <sup>2</sup> K]

Infiltrasjon ved 50 Pa trykkdifferanse, n50	1,5	0,6	1,5	[1/h]
Spesifikk vifteeffekt, SFP	1,5	1,5	2	[kW/(m <sup>3</sup> /s)]
Virkningsgrad gjenvinner	80	80	70	[%]

### 2.1.2 NS 3701 - Passivhusstandard for yrkesbygg

Et passivhus er en bygning der termisk komfort kan oppnås kun ved hjelp av forvarming eller forkjøling av den friske luften som trengs for å oppnå tilstrekkelig kvalitet på inneluften – uten behov for ytterligere resirkulering av luft [32]. Dette er Passivhusinstituttet i Tyskland sin definisjon av passivhus og begrepet er bredt benyttet i europeiske land. Den norske passivhusstandarden blir satt av standardene NS 3700 (boligbygg) og NS 3701 (yrkesbygg) [33]. Standardene inneholder kriterier for passivhus og lavenergihus. Her blir det stilt strenge krav til varmetap, energi til belysning (LENI), oppvarmings- og kjøle behov, samt minstekrav til enkelte bygningskomponenter. Standardene er utarbeidet av Standard Norges komité SN/K 034 og ble fastsatt 2013. For mange tilfeller vil kravene i disse standardene være det som skal oppnås ved prosjektering av nybygg eller etterarbeid på eksisterende bygg. Formlene for å beregne kravet til oppvarming og kjøling er vist under. Hvor formelen for oppvarmingsbehov er gjeldende ved årsmiddeltemperatur under 6,3°C og gulvareal over 1000m<sup>2</sup>. For beregning av kjølebehov er formelen gjeldende ved forutsatt dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold over 20°C. Koeffisienter er gitt i standarden og klimadata er hentet fra Byggforskserien 451.021[34].

$$\text{Spesifikk oppvarmingsbehov} = EP_{H,0} + K_1(6,3 - \theta_{ym}) \quad (1)$$

Hvor:

- $EP_{H,0}$  = Basis netto spesifikt oppvarmingsbehov [kWh/m<sup>2</sup>]
- $K_1$  = Klimakoeffisient [-]
- $\theta_{ym}$  = Årsmiddeltemperatur [°C]
- $A_n$  = Oppvarmet gulvareal, BRA [m<sup>2</sup>]

$$\text{Spesifikk kjølebehov} = \beta(DUT_s - 20) \quad (2)$$

Hvor:

- $\beta$  = Kjølebehovskoeffisient [-]
- $DUT_s$  = Dimensjonerende utetemperatur sommerforhold [°C]

### 2.1.3 NS 3031:2014 - Bygningers energiytelse

NS 3031 er standarden som beskriver metodene for beregning av energibehov og legger til grunn standardiserte inndata og klimadata for beregningen [35]. Den omfatter tre ulike beregningsalternativer, som baserer seg på både stasjonær og dynamiske metode eller detaljert beregningsprogram. I beregning av energibehov blir det tatt høyde for alle energipostene til bygget, som er oppvarming, varmtvann, vifter og pumper, belysning, utstyr og kjøling. Standarden er tilpasset for å dokumentere mot energikrav i forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK) og for å

beregne energiytelse opp mot forskrift om energimerking av bygg. Standarden kompletterer og følger reglene og metodene der de finnes i de europeiske standardene knyttet til Bygningsenergidirektivet.

#### **2.1.4 NS-EN 15251:2007 - Inneklimastandarden**

Standarden angir foreslåtte grenseverdier for temperatur, luftmengder, fuktighet, avgassing fra bygningsmaterialer, støy og belysning [36]. Det blir forutsatt at verdiene kan benyttes av alle medlemslandene i CEN, EUs offisielle standardiseringsorganisasjon, hvor ingen andre standarder er bindende. Grunnet ulike klimatiske forhold åpner standarden for nasjonale tillegg. Standarden har som formål å utfylle ytelser i TEK 17 og sikre et godt inneklima i bygg. Alle gitte verdier i standarden er veiledende, men viktighet av et godt inneklima må tas hensyn til ved prosjektering av bygg.

#### **2.1.5 NS-EN 3720:2018 - Metode for klimagassberegning**

Standarden angir beregningsmetode for klimagassutslipp knyttet til bygningens livsløp [37]. Den tar hensyn til produkter, varer og tjenester relatert til bygging samt drift, bruk og avhending av bygningen. I standarden blir krav for beregningsmetode definert og kan også anvendes for beregning av deler av bygget, etter prinsippet «vugge til grav». Formålet med standarden er å standardisere en metode for klimagassberegninger for bygninger basert på regnskaps-LCA. Her blir det også foreslått utslippsfaktorer knyttet til ulike produksjonsteknologier.

#### **2.1.6 NS 3454:2013 - Livssyklus kostnader for byggverk - Prinsipper og klassifisering**

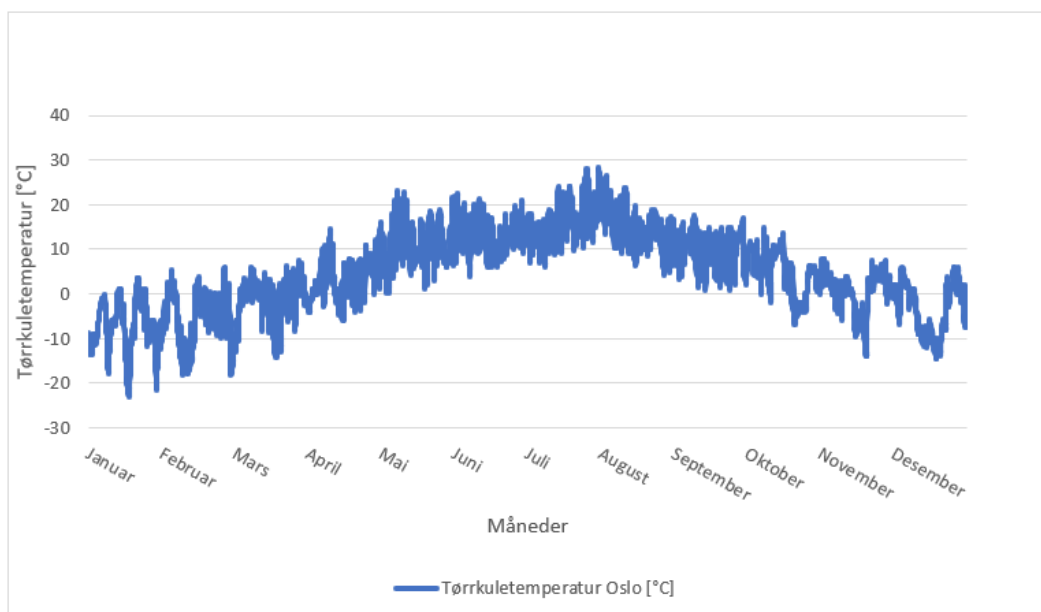
Standarden omfatter kalkulasjonsmetodikk og kostnadsoppstilling for kalkulasjon av livssyklus kostnader for byggverk og bygningsdeler [38]. Standarden definerer kostnadsposter og begreper, og klargjør forholdet og sammenhengen mellom disse. Livssyklus kostnadene omfatter alle kostnader som påløper ved oppføring, bruk og avhending av en bygningsdel eller et byggverk. Her blir det også definert ulike kostnadsklassifikasjoner med ulike underposter.

#### **2.1.7 Arbeidstilsynets veiledning 444 - Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen**

Dette er en veiledning utgitt av Arbeidstilsynet i 1991 og brukes for prosjektering av inneklima til yrkesbygg [39]. Veiledningen foreslår ulike tabellverdier for blant annet temperatur, luftfuktighet, luftmengder, lufthastighet og forurensninger. Ved dokumentasjon av at verdier i veiledningen ikke er tilfredsstillt kreves det tiltak. Veiledningen viser også til TEK 17 og NS 15251:2007.

## **2.2 Klimadata**

Klimaet har en stor påvirkning på et byggs energibruk og inneklima. Det norske klimaet er kjennetegnet som kaldt og i stor grad variert. Dette er det flere årsaker til som varme fra Golfstrømmen og skjerming fra fjell. For dette studiet er det benyttet en klimafil som skal representere klimaet for Oslo. **Figur 1** under viser den gjennomsnittlige tørrkuletemperaturen for Oslo i 2017, hvor man ser store temperaturvariasjoner igjennom et år.



Figur 1 Månedlig oversikt over tørrkuletemperatur Oslo

## 2.3 Norsk Prisbok

Norsk Prisbok er et oppslagsverk for norsk byggebransje og er utgitt av Norconsult Informasjonssystemer AS og Bygganalyse AS siden 2010 [40]. Den inneholder bred og mangfoldig prisinformasjon vedrørende kostnader for et byggeprosjekt, samt LCC og karbonfotavtrykk verdier. Boken er tilgjengelig på internett, papirformat og som nedlastbar app. I henhold til endringer i standarder og priser blir boken oppdatert hvert år. Håndboken gir detaljert informasjon av elementene i flere prislinjer på NS 3420 nivå. Her får man informasjon som enhetspriser, LCC-verdier, CO<sub>2</sub>-ekvivalenter, enhetstider, reseptmengder, materialpris, UE-priser og arbeid. Grunnet bokens brede bruksområde og funksjonalitet som kalkyleverktøy har den etablert seg som en sterk referansekilde i den norske byggebransjen.

## 2.4 Byggforskserien

Byggforskserien gir dokumenterte løsninger og anbefalinger for prosjektering, utførelse og forvaltning av bygninger [41]. Den inneholder blant annet 800 anvisninger for utforming og utførelse av konstruksjoner. Det er SINTEF som utvikler og utgir anvisningene, ofte i samarbeid med relevante fagmiljøer. Byggforskserien kan brukes innenfor prosjektgrunnlag, arbeidsbeskrivelse og som dokumentasjon i byggesaker.

## 2.5 Simuleringsverktøy

Grunnet behov for bedre nøyaktighet og flere muligheter til simuleringsverktøy har det igjennom de siste årene blitt utviklet flere forskjellige simuleringsverktøy. De har alle ulike fordeler og ulemper, som kan være knyttet til deres brukervennlighet, muligheter og deres funksjonelle grensesnitt mot andre programmer. Hensikten med simuleringsverktøyet brukt i dette studiet er beregning av

energibruk og kontroll av relevante krav. Det vil være flere faktorer som vil påvirke nøyaktigheten av resultatene, men størst vil være den benyttede inndataen for simuleringene. Simuleringsverktøyene benytter seg av matematiske beregningsmodeller for ulike prosesser knyttet til innemiljøet i bygget. Dette vil være knyttet til termiske, aktiniske, atmosfæriske og akustiske prosesser, som kan avvike fra de faktiske prosessene som er i bygget. Derfor er det viktig at benyttet simuleringsverktøy er validert mot anerkjente internasjonale standarder for testing av beregningsmetoder som ASHRAE 140 og BESTTEST. Slik vil man kunne sikre størst nøyaktighet til simuleringene, men fortsatt kan avvik fra faktiske verdier oppstå.

### 2.5.1 IDA-ICE

IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ICE) er et dynamisk energisimulerings program utviklet av EQUA Simulation AB siden 90 tallet [42]. Programmet har mulighet for detaljprosjektering av bygget eller IFC import av bygningsmodellen. IDA-ICE sine beregninger av inneklime og energi er gjort med matematiske modeller hvor et Modelica-lignende språk kalt Neutral Modell Format (NFM) blir benyttet. Programmet består av et strukturert brukergrensesnitt med forside som viser de ulike sonene og de viktigste bygningsparameterne. Brukeren kan definere byggets oppvarmingssystem (Plant), ventilasjonsaggregat (AHU), klimalokasjon og oppbygningen til klimaskjermen. For klimadata har programmet muligheten til å bruke test referanse år (TRY), ASHRAE IWEC, IWEC 2 og Energy Plus Weather data [43]. Bygget kan bli simulert med detaljerte års eller periode definerte simuleringer etter ønskete output resultater. De ulike simuleringene som IDA-ICE kan gjennomføre er blant annet energi, dagslys, over oppvarming, varme og kjølesimuleringer.

### 2.5.2 EnergyPlus

EnergyPlus er et energisimulerings program utviklet av flere universiteter med støtte fra U.S Department of Energy (DOE) [44]. Det ble først utgitt i 2001 og den siste versjonen 9.4.0 kom i 2020. Programmet blir brukt for å simulere hele byggets energiforbruk til varme, kjøling, ventilasjon, belysning, intern laster og vannbruk. EnergyPlus har åpen kildekode og benytter seg uten teknisk grensesnitt. Det fungerer ved å lese ulike innputt filer for å så gi ut outputfiler i form av tekst filer. Programmet har funksjoner og muligheter knyttet til; kombinasjon av integrerte løsninger, brukerdefinert tidsintervall, varmebalanse og luftstrømmer mellom soner, termisk komfort og avanserte styringsstrategier. Prosessen med programmet kan bli beskrevet med trinnene:

- 1) Samle bygningsinformasjon
- 2) Skript eller finn innputtfiler, som for eksempel klimafil
- 3) Simuler
- 4) Analyser

### 2.5.3 SIMIEN

SIMIEN er et dynamisk simuleringsverktøy av et byggs energibruk og inneklimate [45]. Programmet er utviklet av Programbyggerne AS og ble først lansert 2008. SIMIEN er mye brukt innenfor norsk bygg industri grunnet dets brede bruksområde. Dette er innenfor evaluering mot norske byggeforskrifter, energimerking, beregning av årlig energibehov, validering av inneklimate og dimensjonering av oppvarmingsanlegg, ventilasjonsanlegg og romkjøling. Programmet lar brukeren dele bygget i definerte soner og detalj modellere ulike bygningsparametere. Man har mulighet for å gjennomføre ulike simuleringer og i tillegg vurdere lønnsomhet knyttet til renoveringstiltak.

### 2.5.4 TRNSYS

TRNSYS står for Transient System Simulation Tool og er et grafisk basert programvaremiljø som simulerer oppførselen til ulike dynamiske prosesser [46]. Programmet er utviklet av University of Winsconsin og vært kommersielt tilgjengelig siden 1985. Det blir brukt for simuleringer av termiske og elektriske energisystemer i bygg, men kan også brukes for prosesser innenfor trafikkflyt og biologi. TRNSYS er en solid algebraisk og differensialligningsløser som er i stand til å lese og behandle en tekstbasert inndatafil. Den benytter seg av en brukervennlig grafisk forside som gjør brukerens jobb med å montere en detaljert systemsimulering fra komponentdeler til en enkel oppgave. Brukeren har mulighet til å skrive egne og endre eksisterende komponenter i programmet. Kjøp av TRNSYS-miljøet inkluderer tilgang til dets store bibliotek og åpne kildekode.

### 2.5.5 Sammenligning av simuleringsverktøy

Simuleringsverktøyene som er drøftet i denne oppgaven har ulike fordeler og ulemper. Knyttet til SIMIEN er mulighetene til styring av komponenter, optimalisering og import funnet for begrenset. EnergyPlus, TRNSYS og IDA-ICE tilbyr flere av de samme mulighetene og kunne alle vært benyttet i dette studiet. Grunnet at IDA-ICE har en stor grad av nøyaktighet, brukervennlighet og tidligere versjoner av bygget er tilpasset dette programmet, er det funnet mest hensiktsmessig å anvende dette programmet for studiet. [Figur 2](#) er en presentering av deres nøkkelmuligheter og er en oppsummering av teorien knyttet til simuleringsverktøyene.

Simuleringsverktøy	Gratis?	Støtter det optimalisering?	Støtter det IFC import?	Tilpasset kontroll mot Norske Standarder?	Kan det gjennomføre parallelle simuleringer?
IDA-ICE	Nei	Ja	Ja	Nei	Ja
EnergyPlus	Ja	Ja	Ja	Nei	Ja
SIMIEN	Nei	Nei	Nei	Ja	Nei
TRNSYS	Nei	Ja	Ja	Nei	Ja

Figur 2 Sammenligning av simuleringsverktøy

## 2.6 Optimaliseringsverktøy

Det finnes en rekke generiske optimaliseringsverktøy som er egnet for å bruke i kombinasjon med et energisimuleringsprogram. Flere av disse er allerede presentert i litteraturstudiet og på grunn av deres



ulike funksjonaliteter brukt forskjellig. Felles for alle verktøyene er at de er under stadig utvikling, men de har ulik grad av brukervennlighet, tilgjengelighet, hastighet og nøyaktighet. I dette studiet er optimaliseringsverktøyet GenOpt benyttet og derfor nærmere forklart.

### 2.6.1 GenOpt

GenOpt (Generic Optimization Program) er et optimaliseringsprogram for minimalisering og maksimering av en definert objektivfunksjon som er gitt av et eksternt simuleringsprogram [47]. Programmet kan kobles til alle simuleringsprogrammer som leser en innputt tekstfil og gir ut en output tekstfil. GenOpt er skrevet i Java og er derfor plattformuavhengig. På grunn av plattformuavhengigheten og det generelle grensesnittet er GenOpt anvendelig for et bredt spekter av optimaliseringsproblemer. GenOpt støtter parallell beregning, hvor antallet vil være avhengig av CPU tilgjengelig på maskinen. Programmet benytter seg av disse ulike optimaliseringsalgoritmene:

- Generalized Pattern Search (GPS) algoritmer, (*GPS CoordinateSearch* og *GPS HookeJeeves*): Kjøres ved hjelp av flere initialpunkter
- Particle Swarm Optimization (PSO) algoritmer, (*PSOCC*, *PSOCCMesh*, og *PSOIW*): De er globale heuristiske optimaliseringsalgoritmer og brukes til kontinuerlige og/eller diskrete uavhengige variabler.
- Discrete Armijo Gradient algoritme: En algoritme som tilnærmer graderinger etter endelige forskjeller og bruker Armijo linjesøkealgoritmen.
- Hybrid algoritme, (*GPSPSOCCCHJ*): Det begynner først en Particle Swarm Optimization for kontinuerlige og diskrete uavhengige variabler, og bytter deretter til Hooke-Jeeves Generalized Pattern Search-algoritme for å avgrense de kontinuerlige uavhengige variablene.

### 2.6.2 MOBO

MOBO (Multi Objective Building Optimization tool) er et optimaliseringsverktøy som er utviklet ved Aalto University i Finland [48]. Programmet er som GenOpt, skrevet i Java og inneholder mange av de samme algoritmene. Programmet har mange nyttige funksjoner som muligheten for multi-objektiv optimalisering, håndtering av diskrete og kontinuerlige verdier og mulighet for parallell databehandling. Ulempen med programmet er at det har begrensninger knyttet til innputt-parametere.

### 2.6.3 Opt-E-Plus

Opt-E-Plus er et optimaliseringsverktøy utviklet av National Renewable Energy Laboratory (NREL) og blir brukt sammen med EnergyPlus for optimalisering [23]. Opt-E-Plus er en samling av inngangs- og utdatafiler, systemkataloger og datamaskinrutiner som bruker en XML-datamodell for å overføre informasjon mellom forskjellige komponenter. Programmet tillater distribuert programmering og støtter valg av automatiserings- og optimaliseringsstrategier.

## 2.6.4 Sammenligning av optimaliseringsverktøy

Ved valg av optimaliseringsverktøy er det valgt å vektlegge programmets brukervennlighet og muligheter for tilpasning av algoritmer. Siden benyttelse av verktøyene krever en stor grad av erfaring er det valgt å bruke det programmet som det er størst kjennskap til. Samtidig er det viktig å presentere de ulike verktøyene som også blir i stor grad brukt i tilsvarende studier. De mest brukte og deres muligheter er vist med [Figur 3](#) under.

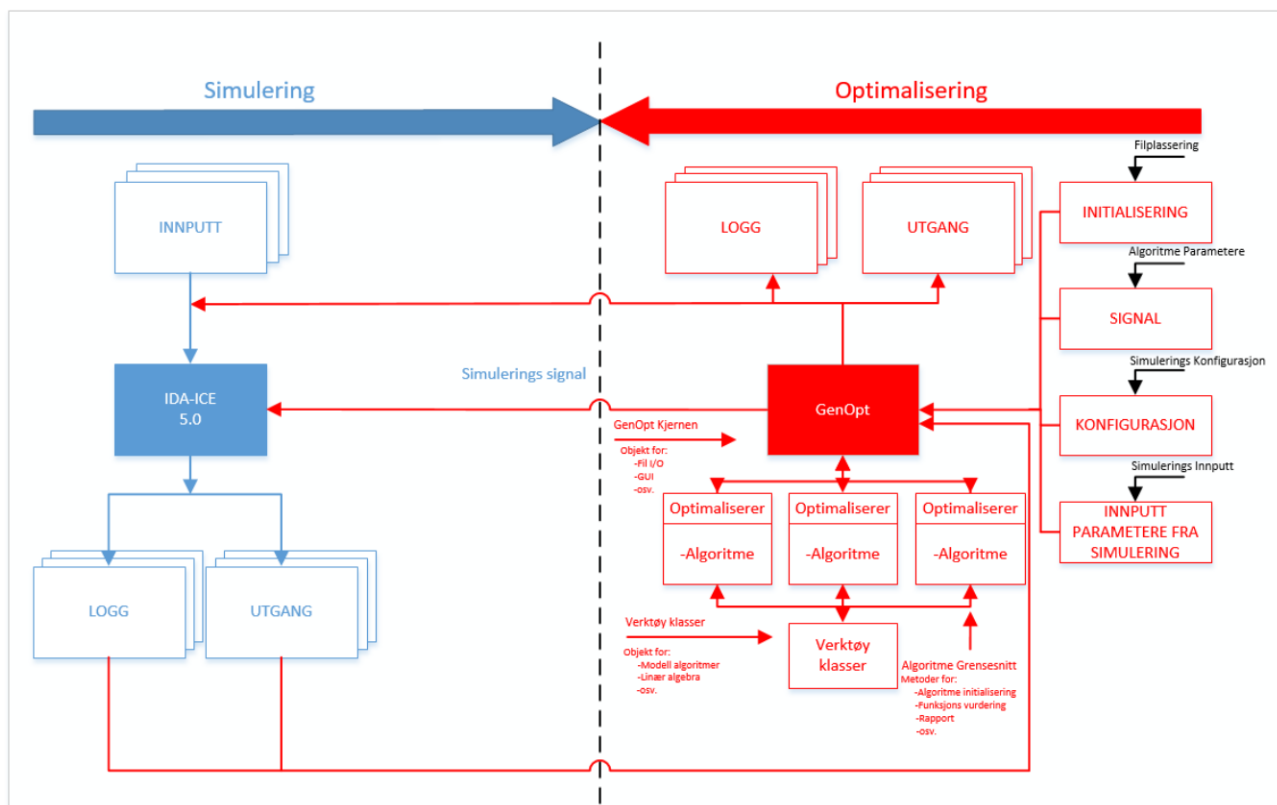
Optimaliseringsverktøy	Gratis?	Inkluderer det multi-objektive algoritmer?	Håndteres begrensingsfunksjoner automatisk?	Støttes parallell databehandling?	Håndteres diskrete og kontinuerlige variable?	
Tilpasset	Opt-E-Plus	Ja	Nei	Nei	Nei	
	GENE_ARCH	Ja	Ja	Nei	Nei	
	BEopt	Ja	Nei	Nei	Nei	
	TRNOPT	Nei	Ja	Nei	Nei	
	MultiOpt2	Nei	Ja	Ja	Ja/Nei*	
	jEPlus+EA	Nei	Ja	Nei	Ja	Nei
Generisk	GenOpt	Ja	Nei	Ja	Ja	
	MOBO	Ja	Ja	Ja	Ja	
	Model-Center	Nei	Ja	Ja/Nei*	Ja	Nei
	modeFRONTIER	Nei	Ja	Ja	Ja	Ja
	DAKOTA	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	iSIGHT	Nei	Ja	Ja	Nei	Ja
MATLAB	Nei	Ja	Ja/Nei*	Ja	Nei	

Ja/Nei\* Betyr "Ja" for noen algoritmer og "Nei" for andre algoritmer i optimaliseringsverktøyet.

Figur 3 Sammenligning av optimaliseringsverktøy

## 2.7 Prosessbeskrivelse av IDA-ICE og GenOpt

I studiet blir IDA-ICE versjon 5.0 beta 17 [49] benyttet med GenOpt v3.1. [Figur 4](#) beskriver grensesnittet mellom verktøyene og er punktvis forklart:



Figur 4 Prosessbeskrivelse av IDA-ICE og GenOpt

- GenOpt ber om inngangsfiler som må tilpasses for det eksterne simuleringsprogrammet. Dette er initialiseringsfil, oppstartfil, signalfil, konfigurasjonsfil, mal-fil og fun.java-fil.
- GenOpt optimaliserer med en valgt optimaliseringsalgoritme, her kan brukeren velge eller legge inn egen algoritme. I dette algoritmegrensesnittet kan man få de innledende innstillingene for algoritmen, verdiene til de uavhengige variablene og deres grenser. Den valgte algoritmen for studiet er PSOCC, siden den oppnår raskt og effektiv konvergens. Her vil man også kunne ha mulighet for å blant annet funksjonsevaluere simuleringen eller få rapport av optimaliseringsrunden.
- GenOpt får resultat tekstfilen fra IDA-ICE og justerer inngangsverdiene til variabler definert fra signalfilen. De nye variablene som blir satt opp er bestemt fra optimaliseringsalgoritmen i GenOpt biblioteket. Det blir lagd en ny innputt fil som blir sendt til IDA-ICE.
- GenOpt gir deretter et signal til IDA-ICE som starter simuleringene, hvor objektivfunksjonen blir simulert flere ganger.
- Når simuleringene er fullført blir resultat tekstfilen igjen sendt til GenOpt for en ny optimaliseringsrunde, som også kalles en generasjon. Antallet generasjoner kan justeres og vil ha stor betydning på tiden en optimaliseringsprosess vil ta. Dette er en iterativ prosess til objektivfunksjonen konvergerer.

*Initialiseringsfil:* Her kan brukeren spesifisere hvordan simuleringsprogrammet skal starte og hvor GenOpt kan finne verdien for objektivfunksjonen. Den spesifiserer filplasseringer.

*Oppstartfil:* Denne filen inneholder all informasjon for oppstart av simuleringen. Dette er innputtfil, konfigurasjonsfil, resultatfil, klimadatafil og fil for objektivfunksjonen.

*Signalfil (command-fil):* Filen hvor man bestemmer optimaliseringsalgoritmen, antall generasjoner osv.

*Konfigurasjonsfil:* Filen hvor feilmeldinger/opptattsignaler som kan oppstå ved simulering er lagret.

*Inndataparameter fra simulerings fil:* Filen som inneholder en eller flere inputdata for simulering.

*Eksternt simuleringsverktøy:* IDA-ICE

*Logg:* Filen som inneholder handlingene som har blitt gjennomført og generell informasjon av optimaliseringsprosessen.

*Utgang:* GenOpt skriver to output tekstfiler som inneholder resultatene fra iterasjonene.

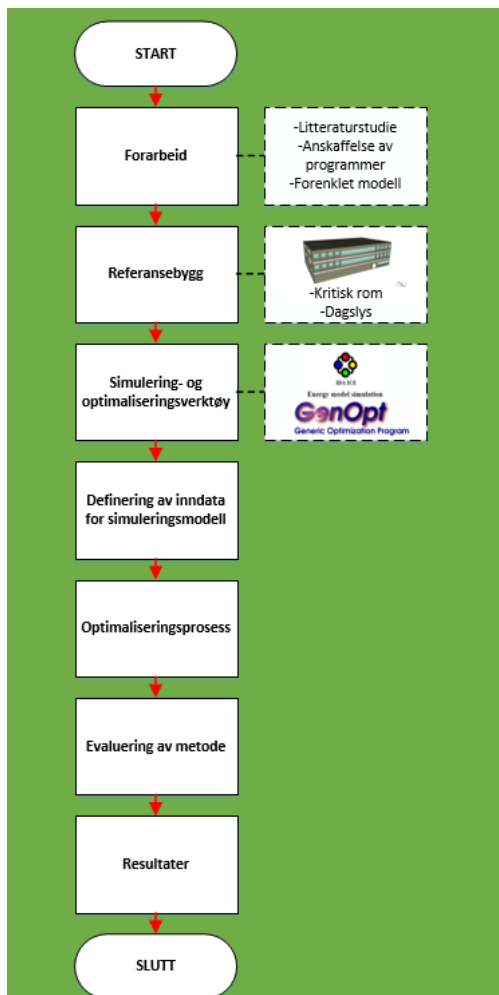
## 2.8 Livssyklus kostnad (LCC) og Livssyklus karbonfotavtrykk (LCCf)

Livssyklus kostnad er definert som hele den økonomiske levetidsutgiften til bruk av et produkt eller tjeneste. Livssyklusberegninger er viktig å kunne gjennomføre både i tidligfase og i løpet av byggeperioden for å kunne vurdere konsekvensen av for eksempel en fasadeløsning. Den gjennomførte livssyklus kostnad beregningen skal ikke bare ta hensyn til kostnaden av å investere eller konstruere en løsning. Det skal også bli tatt hensyn til kostnadene av påløpt drift, vedlikehold, utvikling (FDV-kostnad) og rivning. Flere studier har vist at energibruken har en stor påvirkning på kostnaden. Derfor blir prisen av energiforsyningen også tatt med i beregningen til den valgte designløsningen. For å ta hensyn til eskalering og inflasjon til priser over analyseperioden blir det beregnet en diskonteringsfaktor.

Livssyklus karbonfotavtrykket er definert som det totale CO<sub>2</sub> utslippet igjennom produkt-, gjennomføring-, bruks-, slutt- og utenfor systemgrensestadiet til bygget. Dette innebærer blant annet transport, produksjon, montering, utskiftning, rivning, gjenvinning og ombruk. Ved å ta hensyn til alle disse stadiene kan man kalle vurderingen som «vugge til grav». For å vurdere et byggs eller en løsnings miljøpåvirkning GWP (Global warming potential) blir definisjonen CO<sub>2</sub>eq ofte benyttet, CO<sub>2</sub> ekvivalenter. Dette er en definisjon som sier hvor stor oppvarmingseffekten en klimagass har ved å sammenligne med gassen CO<sub>2</sub>. Dette uttrykket blir blant annet også brukt for å definere et materials sitt bundet utslipp. Som er definert som utslippet for produksjonen av materialet og hvor mye det avgir i sin levetid.

### 3 Metode

Figur 5 beskriver den foreslåtte metoden for studiet. Den består av flere delprosesser, som skal bli tatt for seg i kapitlet.



Figur 5 Metodebeskrivelse av studie

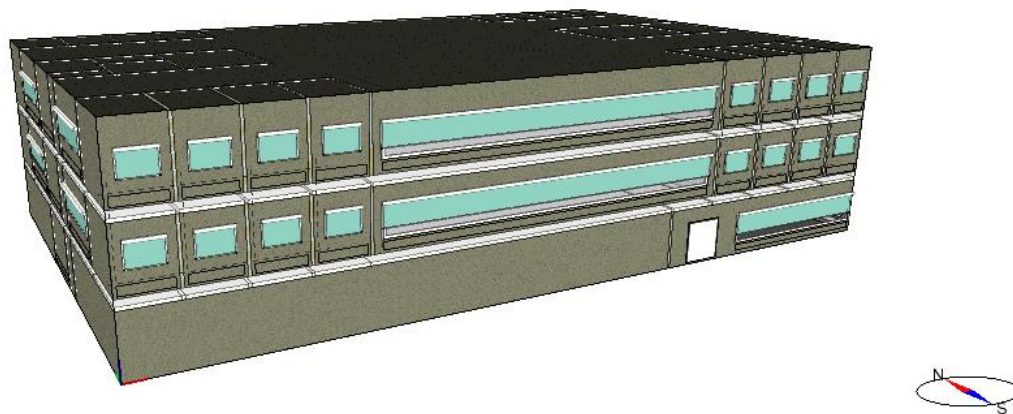
#### 3.1 Forarbeid

Dette var den første prosessen i studiet hvor litteraturstudie, anskaffelse av programmer og etablering av metode ble gjort. Fokusområdet var å tilbringe seg kunnskaper og informasjon for å kunne bruke de nødvendige verktøyene i studiet. Før en referansemodell ble utviklet ble metodene for studiet testet for en forenklet modell. Denne modellen var nyttig å bruke som utgangspunkt for studiet og var også en kontroll av at alle verktøyene for optimaliseringen fungerte.

#### 3.2 Referansebygg

For studiet ble et typisk kontorbygg vurdert og som er lokalisert i Oslo, Norge. Bygget består av tre etasjer og har et totalt BRA på 3000 m<sup>2</sup>. Byggets klimaskjerm, HVAC system, belysning og

settpunkter for soner ble valgt for å tilfredsstille krav gitt i TEK 17. [Figur 6](#) viser utformingen av referansebygget og dets orientering. [Tabell 3](#) under gir generell bygningsinformasjon. Bygget er modellert slik at «vindu mot gulv» faktor ikke overskrider krav på 25%, med et totalt vindusareal på 251,2m<sup>2</sup>.



Figur 6 Utforming av referansebygget

Tabell 3 Generell bygningsinformasjon

Parameter	Verdi	Enhet [-]
Bygnings orientering	Nord-Sør	[-]
Etasjer	3	[n]
Etasjehøyde	2,9	[m]
Bygnings høyde	10,5	[m]
Total BRA	3000	[m <sup>2</sup> ]
Totalt bygnings volum	9062	[m <sup>3</sup> ]
Total dør areal	21	[m <sup>2</sup> ]
Total vindus areal	251,2	[m <sup>2</sup> ]

### 3.2.1 Inndeling av soner

Referansebygget er modellert med en realistisk soneinndeling, slik at bygget er representativt for et typisk kontorbygg. Hvor den store arealandelen av bygget er tilregnet åpent kontorlandskap, med kontorer plassert i hjørnene av hver etasje. Det åpne kontorlandskapet består av arealer for arbeid, kjøkken, sitteplasser for måltider og diverse utstyr. Første etasje består av parkering, resepsjon, som har tilgang til trapp og heis. Det er også arealer for forretningslokaler i etasjen. Andre og tredje etasje har lik rominndeling og inneholder:

- 16 kontorer, et åpent kontorlandskap, et møterom, et konferanserom, en WC, en garderobe, en teknisk sjakt, trapp og heis.

[Vedlegg A](#) gir en detaljert beskrivelse referansebyggets soneinndeling.

### 3.2.2 Oppvarming og kjøling

For referansebygget skal det være forutsatt bruk av fleksible varmesystemer med lavtemperatur løsninger. På sentralt bygningsnivå bruker bygget elektrisitet og fjernvarme som energiforsyning til oppvarming og kjøling. I rommene blir det brukt et vannbårent radiatorsystem. Grunnet benyttelse av vinduer med lav U-verdi er det ikke nødvendig å plassere radiatorene under vindu for hindring av kaldras. For sonene er kjøling forutsatt med bruk av ventilasjonskjøling og passive kjøletiltak som solskjerming og termisk masse. Det beregnede oppvarmings og kjølebehovs passivhuskravet til bygget er beregnet i [Tabell 4](#) under.

Tabell 4 Kjøle- og oppvarmingsbehov for referansebygget

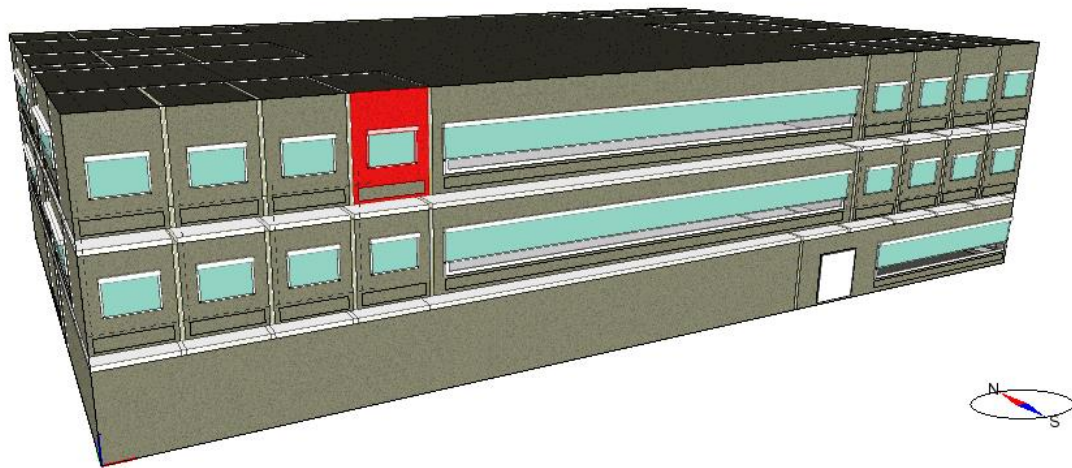
Parameter	Referansebygg, Oslo, Passivhus	Referansebygg, Oslo, Lavenergi	Enhet [-]
$\theta_{ym}$	6,1	(-)	[°C]
DUTs	25,4	(-)	[°C]
$\beta$	1,4	2,1	[-]
EP <sub>H,0</sub>	20	35	[kWh/m <sup>2</sup> år]
K <sub>1</sub>	3,6	4,9	[-]
Kjølebehovskrav	7,56	11,34	[kWh/m <sup>2</sup> år]
Oppvarmingsbehovskrav	20,72	35,98	[kWh/m <sup>2</sup> år]

### 3.2.3 Solskjerming

Det er forutsatt bruk av utvendig screen som solskjerming for bygget. Solskjermingen skal fungere effektivt og være automatisert, med mulighet for manuell overstyring. Den utvendige solskjermingen blir styrt av solinnstråling og er aktivert ved 100 W/m<sup>2</sup>. Parametere knyttet til solskjerming kan bli funnet i [Vedlegg B](#).

### 3.2.4 Kritisk rom

Det ble funnet nødvendig å identifisere kritisk rom for bygget siden denne sonen skulle brukes som utgangspunkt til begrensingene i det grafiske skriptet. Metoden for dette var å gjennomføre en «Overheating» simulering og velge sonen med høyest operativ temperatur. Kontor i tredje etasje som er sør-vendt og har solinnstråling fra eget og nabovindu ble valgt som kritisk rom. Sonen er vist med [Figur 7](#) under.



Figur 7 Lokasjon av kritisk rom

### 3.2.5 Dagslys

For å kontrollere at sonene hadde tilstrekkelig med dagslys og at vinduene hadde en passe størrelse ble det gjennomført en «Daylight» simulering av bygget. Dette ble gjort ved å først definere overflate refleksansene. For de ulike overflatene ble det benyttet  $\text{vegg}=0,5$ ,  $\text{tak}=0,7$  og  $\text{gulv}=0,2$ . Simuleringen blir gjort under «CIE Overcast sky», som er en modell som representerer påvirkningen av skyer under simuleringen. Andre innstillinger for simuleringen var «High precision» og kontroll for skjerming «None drawn». Det ble simulert for rom ment for varig opphold og en tiltenkt sittende person som er 0,5m fra yttervegg og 0,8m over gulv. For en nøyaktig presentering av dagslys distribusjonen i sonene er det valgt å benytte en «Resolution» på 0,25m. Denne dagslys simuleringen ble også gjort for optimaliserings scenarioene, grunnet bytte av vindu og solskjerming.

## 3.3 Simulering- og optimaliseringsverktøy

IDA-ICE er som nevnt tidligere benyttet som energisimuleringsverktøy for dette studiet. På grunn av IFC import og grad av nøyaktighet blir dette programmet også i større grad benyttet i rådgivning- og forskningsbransjen. Programmet er krevende i starten, men detaljerte brukermanualer og videoer på nett gjør bruken enklere. Som verktøy for optimalisering blir GenOpt, Generic Optimization også benyttet.

## 3.4 Definerings av inndata for simuleringsmodell

### 3.4.1 Konstruksjon

Ved valg av parametere for klimaskjermen til bygget er det valgt å bruke verdier i henhold til § 14-3. Minimumskrav til energieffektivitet i TEK 17. For normalisert kuldebroverdi (NKV), SFP-verdi og årsgjennomsnittlig temperatur virkningsgrad er verdiene i samsvar med de foreslåtte energiltakene i § 14-2. U-verdien for yttervegg er det maksimale varmetapet som går igjennom hele konstruksjonen



og dets bestående sjikt. Tak består av noen andre sjikt, men skal ikke overskrive den gitte U-verdien. Byggets vegg og tak konstruksjon er modellert etter Byggforskserien rapport 471.401 og 471.013

Infiltrasjon kan bli definert i IDA-ICE med to funksjoner, enten ved vind eller egendefinert. Med definering av vindbasert infiltrasjon kan det velges trykk koeffisienter for byggets ytre overflater ved en bestemt infiltrasjons verdi for bygget. Ulike enheter kan brukes, men det er valgt å benytte 0,6 ACH (Air change per hour) distribuert likt over de utvendige overflatene. Kuldebroverdien er valgt som «Overall Internal», med en egendefinert verdi for tak og gulv. SFP-verdien og virkningsgraden er forutsatt høy for tilluft- og avtrekksviften i ventilasjonsanlegget, med 0,75 kW/(m<sup>3</sup>/s) og virkningsgrad på 80%. For varmegjennomstrømming igjennom interne vegger og etasjeskiller er standard verdier antatt. **Tabell 5** viser de benyttede verdiene knyttet til byggets konstruksjon og energieffektivitet.

*Tabell 5 Inndata for konstruksjonen til simuleringsmodell*

<b>Parameter</b>	<b>Verdi</b>	<b>Enhet [-]</b>
Yttervegg, U-verdi	0,22	[W/(m <sup>2</sup> K)]
Tak, U-verdi	0,18	[W/(m <sup>2</sup> K)]
Gulv mot grunn, U-verdi	0,18	[W/(m <sup>2</sup> K)]
Vindu og dør, U-verdi	1,2	[W/(m <sup>2</sup> K)]
Innervegger, U-verdi	0,62	[W/ (m <sup>2</sup> K)]
Etasjeskiller, U-verdi	2,4	[W/ (m <sup>2</sup> K)]
Normalisert kuldebroverdi, Ψ''	0,03	[W/(BRA <sup>2</sup> K)]
Infiltrasjon ved 50 Pa trykkdifferanse, n50	0,6	[1/h]
Spesifikk vifteeffekt, SFP	1,5	[kW/(m <sup>3</sup> /s)]
Virkningsgrad gjenvinner	80	[%]

### 3.4.2 Klimadata og lokasjon

Samtlige simuleringer av referansebygget er gjort ved valg av Oslo/Gardemoen som lokasjon. Her er det bare mulighet å bruke fil fra IWEC. For klimadataprofilen er det valgt å bruke for Oslo/Fornebu, som er hentet fra IWEC 2. Klimadataprofilen gir informasjon angående tid, tørrkuletemperatur, relativ luftfuktighet, vindhastighet, direkte solinnstråling, diffus solinnstråling og en skydekkefaktor. Det er også definert en vindprofil for bygget, her er det valgt å bruke «Suburban (ASHRAE 1993)».

### 3.4.3 Solskjerming

Metoden for solskjerming er det valgt å bruke en utvendig screen av type Markisolette M6544 som er styrt etter sol [50]. Den aktiveres etter at et solinnstrålingsnivå på 100 W/m<sup>2</sup> er målt og har en k-

verdi på 0,08 W/(m\*K). Benyttet type solskjerming vil bare ha påvirkning til energibruk og dagslys, grunnet at pris og CO<sub>2</sub>-utslipp er forutsatt til å være lik for de ulike typene.

### 3.4.4 Settpunktverdier for soner

De ulike settpunktverdiene som er forutsatt for primær- og sekundærsonene er vist i [Tabell 6](#) under. Den optimale settpunkt temperaturen kan være vanskelig å bestemme, grunnet termisk komfort og energibruk. Anbefalingen fra Arbeidstilsynets veiledning 444 er under 22°C og NS 3031 21°C ved driftsperioden og 19°C utenfor driftsperioden. Hvor individuell reguleringsmulighet skal tilstrebes. Andre settpunkt verdier er valgt etter anbefalinger fra relevante standarder og forskrifter, som NS-EN 15251:2007.

*Tabell 6 Settpunkt for soner*

<b>Parameter</b>	<b>Verdi NS 15251</b>	<b>Enhet [-]</b>
Temperatur	21-24	[°C]
CO <sub>2</sub> konsentrasjon	700-1100	[ppm]
RF, relative fuktighet	20-80	[%]
Trykkdifferanse	-20-10	[Pa]

### 3.4.5 Internlaster

Inndata for internlaster i referansebygget er hentet fra NS 3031. Verdiene for internlastene er presentert i [Tabell 7](#) under. For sekundærsoner, som er soner forutsatt uten varig opphold, er det bare tatt hensyn til belastning fra belysning.

*Tabell 7 Internlaster for referansebygget*

<b>Parameter</b>	<b>Verdi NS 3031</b>	<b>Enhet [-]</b>
Personer	4	[W/m <sup>2</sup> ]
Utstyr	11	[W/m <sup>2</sup> ]
Belysning	8	[W/m <sup>2</sup> ]

MET-verdi er en verdi som skal representere aktivitetsnivået til en tenkt person med hensyn til metabolismen. Aktivitetsnivået for en person i sonen er satt til 1 MET. Dette aktivitetsnivået skal tilsvare en person som er i sittende aktivitet. For evaluering av termisk komfort i sonen er forutsatt Clo-verdi viktig. Dette er en verdi for bekledningen til personene i sonen og benyttes for beregning av PMV og PPD.

Denne verdien er satt til å være konstant mellom 0,85 til 0,44, som skal tilsvare forretningsklær. IDA-ICE beregner varmebelastningen fra personer etter å summere antall personer i sonen og multiplisere med MET-verdien. TEK 17 gir verdier for dimensjonering av personbelastning og for kontorer er det gitt 15 m<sup>2</sup>/person. Dermed blir det beregnet antall personer per areal slik:

$$\frac{1 \text{ Person}}{15 \text{ m}^2} = 0,0667 \frac{\text{Personer}}{\text{m}^2} \quad (3)$$

### 3.4.6 Driftstider og tilstedeværelse

Driftstider for bygget er forutsatt etter NS 3031 og presentert i [Tabell 8](#) under. Driftstidene skal være representativt for et typisk bruk av kontorbygg og er derfor også basert på studier gjort til realistisk bruk av norske kontorbygg [51]. [Vedlegg C](#) viser grafene for personbelastning, belysning og utstyr.

Tabell 8 Driftstider for referansebygget

Driftstider	(Timer/Dager/Uker)
Personer	(12/5/52)
Ventilasjon	(12/5/52)
Oppvarming/Belysning/Utstyr	(12/5/52)

### 3.4.7 Ventilasjon

Luftmengdene som er benyttet for referansebygget er basert på foreslåtte preaksepterte ytelser fra TEK 17. Ved driftstid skal det ventileres for personer og materialer, mens utenom driftstid skal det kun ventileres for minste luftmengde. I TEK 17 stilles det krav til en luftmengde på 0,7 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> utenfor driftstid for lavemitterende materialer, produkter og installasjoner og 2,5 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> ved driftstid. For personbelastning ved lett aktivitet er det krav på 26 m<sup>3</sup>/h pers. Dette tilsvarer 0,7 l/sm<sup>2</sup> for materialer og personer, og 0,2 l/sm<sup>2</sup> for bare materialer utenfor driftstid. Det viktig å presisere at dette er minimumsverdier for luftmengder og blir presentert i [Tabell 9](#).

Tabell 9 Luftmengder for referansebygget

Soner	Luftmengde, (utenfor driftstid)	Luftmengde, kjølesesong, (under/utenfor driftstid)	Enhet [-]
Primær soner	2,3 (0,2)	4,0 (0,2)	[l/sm <sup>2</sup> ]
Sekundær soner	0,7 (0,2)	0,7 (0,2)	[l/sm <sup>2</sup> ]

Ventilasjonsstrategien for referansebygget er en CAV-metode, hvor konstante luftmengder blir tilført de ulike sonene. Funksjonen «Schedule» blir benyttet i programmet for å regulere luftmengden. Slik blir ventilasjonen for modellen fleksibel og tilpasset bruken av sonene. Metoden for å prosjektere ventilasjonen for bygget var:

- 1) Åpne byggets ventilasjonssystem, det ble ikke definert en egen AHU eller erstattet med en ny løsning.
- 2) Velg metode for tilluftstemperatur. Det valgt å simulere med en «Constant» tilluftstemperatur på 16°C

- 3) Deretter definer «System type» i sonene til «CAV Primary» eller «CAV Sekundary», avhengig av sone type. I disse løsningene blir det valgt «Schedule» for regulering av luftmengde.
- 4) Kontroller settpunkt for ventilasjonen til sonen, min/maks ble satt til 0 og 1. Dette er tall som vil bli ganget med tall i tidskjemaet.

Ventilasjonsaggregatet er et mekanisk balansert system, hvor det er valgt å bruke en «Standard Air Handling Unit». Denne enheten distribuerer temperaturkontrollert luft ved et gitt trykk. Alle komponentene som enheten består av, har mulighet for endring av viktige parametere. Som nevnt er SFP-verdien og virkningsgraden til viftene blitt satt til, 0,75 kW/(m<sup>3</sup>/s) og 80%. Ventilasjonsanlegget er også aktivert ved helger og helligdager, med minste luftmengde på 0,2 l/s. Aggregatet sin oppbygning er vist i [Vedlegg D](#).

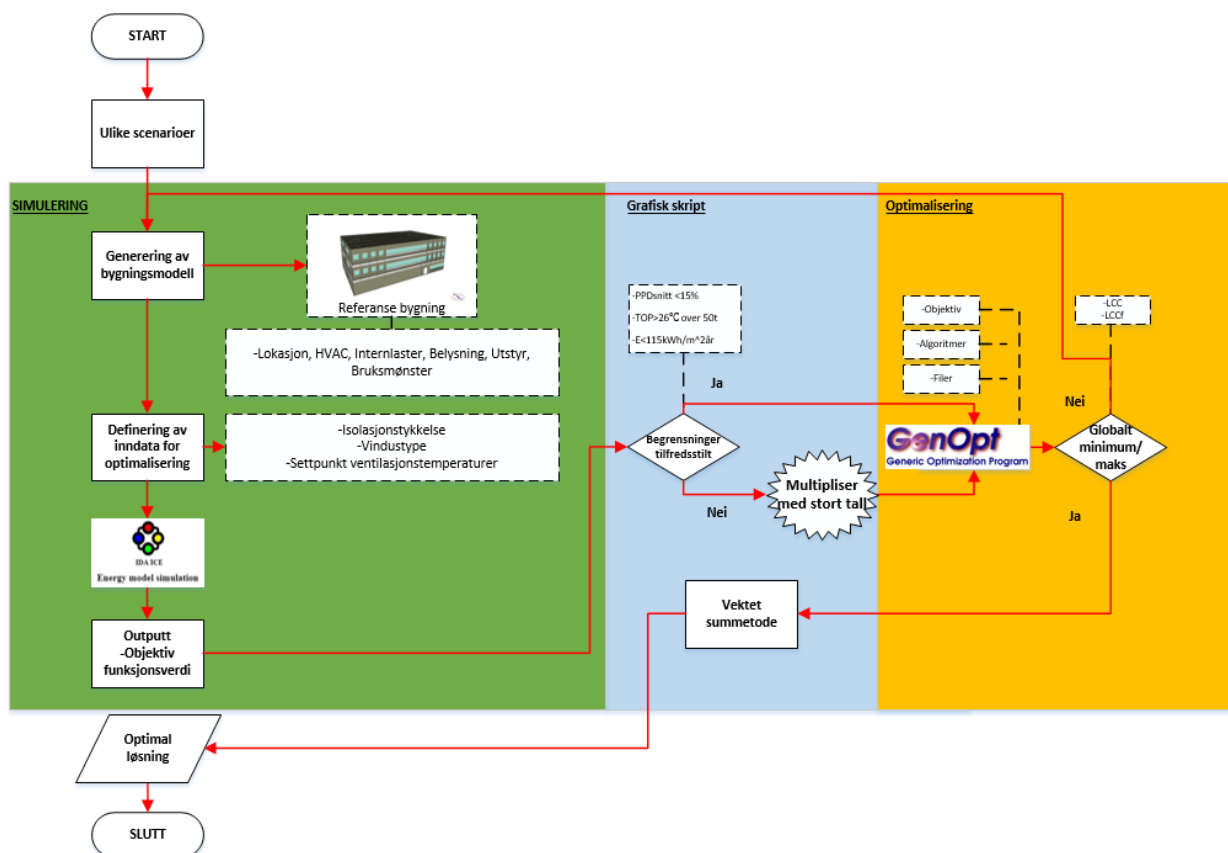
### 3.4.8 Oppvarming og kjøling

For oppvarming av soner er det benyttet et vannbasert radiator system, som tilfører nødvendig effekt for å opprettholde den bestemte settpunkt temperaturer for sonen. Denne effekten kan bli bestemt fra å gjennomføre en «Heating Load» simulering. Ved en slik simulering blir sonene varmet opp ved optimal effektbruk for det mest ugunstige dagene i løpet av et år, uten bruk av ventilasjon. Fra resultatene kan effekten til radiatorene bli bestemt og valgt for sonen. Radiatorene er kontrollert med valg av «Proportional» og styrt av sensor etter «Air temperature».

Referansebygget har et sentralt oppvarmingssystem med bruk av en standard «Plant». Den består av «Generic district heat heater» med 88% virkningsgrad og ubegrenset kapasitet. Dette er valgt i henhold til NS 3031 for fjernvarme og radiatorer. Kjøling blir gjort med en «Generic electricity chiller», som har COP (EER) på 3 og ubegrenset kapasitet. Referansebyggets sin metode for oppvarming og kjøling er vist med [Vedlegg E](#).

## 3.5 Optimaliseringsprosess

Figur 8 under viser optimaliseringsprosessen som er gjort i studiet og blir videre forklart i kapitlet.



Figur 8 Flytskjema av optimaliseringsprosessen

For å gjennomføre den optimale løsningen for renovasjon av referansebygget må det gjennomføres en optimaliseringsprosess. Utgangspunktet for prosessen er definerte TEK 17 krav og videre må det derfor bestemmes et variasjonsområde for parameterne som skal optimaliseres. I tillegg er det ønsket å undersøke påvirkningen av en ulik vekting av objektive for optimaliseringen. Derfor er det forutsatt tre ulike scenarier hvor det ene scenarioet har lik vekting og de andre har forskjellig vekting mellom kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. Optimaliseringen har blitt gjort på en 32 GB RAM Windows 10 (3.4 GHz) PC med Intel ® Core™ i7-4770 CPU og 8 parallelle prosessorer.

### 3.5.1 Ulike scenarier

#### 3.5.1.1 Scenario 1

I dette scenarioet er det valgt å forutsette en lik vekting mellom kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. Metoden for å gjennomføre dette er å benytte en vektingsfaktor på 0,5 i optimaliseringsprosessen. Slik vil objektivene for optimalisering være likestilt, noe som kan være foretrukket ved reovering. Endringen blir gjort i det grafiske skriptet.

### 3.5.1.2 Scenario 2

I scenario 2 vil man vurdere resultatet av å vektlegge kostnad som objektiv for optimalisering. Dette er gjort ved å forutsette et forhold mellom kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp på 0,7/0,3. Dermed vil de optimale løsningene i dette scenarioet være mer lønnsomme, men også ha større CO<sub>2</sub>-utslipp.

### 3.5.1.3 Scenario 3

Det blir også valgt å vurdere et scenario hvor CO<sub>2</sub>-utslippet er viktigst. Dette er gjort for å finne de mest miljøvennlige løsningene. Hvor man benytter samme metode som i scenario 2 og vil i dette scenarioet også ha et forhold av vektlegging på 0,7/0,3.

## 3.5.2 Generering av bygningsmodell

Dette er det første steget ved starten av simuleringen. Her blir informasjon knyttet til blant annet konstruksjon, lokasjon, bruksmønster, belysning og utstyr bestemt for simuleringen. Under optimaliseringsprosessen vil dette være utgangspunktet for simuleringen og basert på resultatene fra forrige simulering blir det valgt nye parametere. Ved eventuelle feil i modellen eller det grafiske skriptet vil denne genereringen ikke kunne gjennomføres. En metode som kan løse dette blir kalt «steg for steg metoden». Den går ut på å legge parameter for parameter til optimaliseringen slik at man kan lokalisere hvor feilen oppstår. Dette er en tidskrevende prosess, men metoden var nyttig for å få det grafiske skriptet til å leses.

## 3.5.3 Definerer av inndata for optimalisering

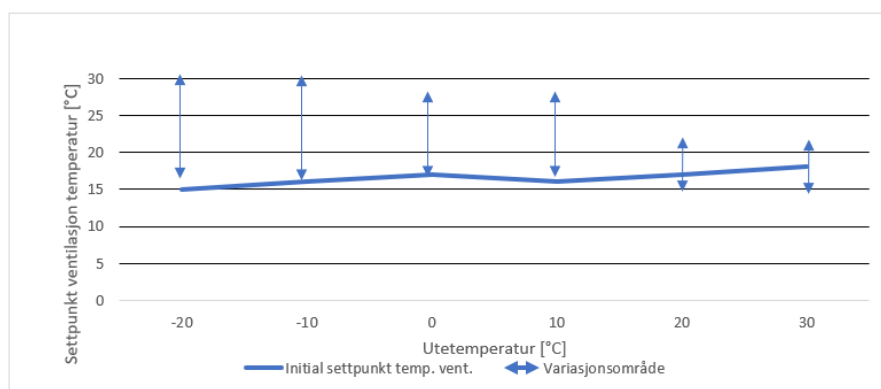
Studiet tar utgangspunkt i at referansebygget har tilfredsstilt TEK 17 kravene og vil renovere for å blant annet redusere energibruket og bli mer miljøvennlig. Basert på tidligere studier er det lokalisert de mest påvirkende faktorene for et byggs energibruk. Det ble vurdert å være blant annet isolasjonstykkelse for klimaskjermen og redusert U-verdi for vindu. Et passende variasjonsområde ble bestemt for å kunne vurdere påvirkningen på energibruket, men også kostnaden og CO<sub>2</sub>-utslippet til løsningene. Isolasjonstykkelser for yttervegg er funnet fra Byggforskserien 471. 411 [52] og isolasjonstykkelser for tak og gulv er i samsvar med løsninger fra Glava [53, 54]. Vinduenes U-verdi er basert på databladet Glassfakta utgitt av Pilkington Norge AS. [55]. Tabell 10 under viser parameterne og deres variasjonsområde for optimalisering.

Tabell 10 Parametere for optimalisering og definerer av variasjonsområde

Parameter	Verdi	Beskrivelse	Enhet [-]
<u>Bygnings konstruksjon</u>			
Yttervegg	(0.095, 0.085, 0.114, 0.14, 0.1738)	Isolasjonstykkelse	[m]
Tak	(0.2, 0.2265, 0.2831, 0.3688, 0.4639)	Isolasjonstykkelse	[m]

Gulv på grunn	(0.1498, 0.1955, 0.2288, 0.4068)	Isolasjonstykkelse	[m]
Vindu	(1.2, 1.12, 1.04, 0.88, 0.72)	U-verdi	[W/m <sup>2</sup> K]
<u>Ventilasjon settpunkt</u>			
16	[15 22]	Temperatur	[°C]
17	[15 22]	Temperatur	[°C]
17	[16 26]	Temperatur	[°C]
18	[16 26]	Temperatur	[°C]
18	[17 30]	Temperatur	[°C]
18	[17 30]	Temperatur	[°C]
<u>Solskjerming</u>			
Markisolette M6544	(-)	Utvendig solskjerming	[-]
Markisolette M3933	(-)	Utvendig solskjerming	[-]
Markisolette M3911	(-)	Utvendig solskjerming	[-]

Ved optimalisering vil settpunkt ventilasjons temperaturen følge grafen vist på [Figur 9](#) under, som også inkluderer det valgte variasjonsområdet. Pilene viser de ulike temperaturene som blir testet i optimaliseringen, ved den bestemte utetemperaturen. Dette vil for eksempel være fra 16°C til 26°C settpunkt temperatur når det er 10°C ute.



Figur 9 Settpunkt for ventilasjons temperatur ved optimalisering

### 3.5.4 Begrensninger - Energibruk og termisk komfort

En nyttig funksjon med det grafiske skriptet er at man kan definere ulike begrensninger og når disse ikke blir tilfredsstillt kan man ved å multiplisere med et stort tall ugyldiggjøre resultatet. I dette studiet er det valgt å legge fokus på energibruket, PPD snitt og operativ temperatur. Energibruket skal tilfredsstillte kravet fra TEK 17 for kontorbygg på 115 kWh/m<sup>2</sup>år. For å sikre at løsningen tar hensyn

til termisk komfort, skal ikke operativ temperatur overskrive 26°C i over 50 timer og PPD snitt være over 15%. Knyttet til PPD snitt blir det også undersøkt om løsningene vil kunne tilfredsstille klasse II på 10%.

### 3.5.5 GenOpt

For optimaliseringsalgoritme er det valgt å benytte «Particle Swarm Optimization» (PSO) [21]. PSO-algoritmer utnytter et sett med potensielle løsninger for et optimaliseringsproblem. Hver potensiell løsning kalles en partikkel, og potensielle løsninger i hvert iterasjonstrinn kalles en populasjon. PSO-algoritmer er globale optimaliseringsalgoritmer og krever ikke graderinger av objektiv funksjonen. Initial populasjonen blir bredt spredt av en tilfeldig tall generator og videre blir lokasjonen til partikkelen bestemt av en partikkel oppdaterings likning. Dette er gjort iterativt for hver generasjon. [Tabell 11](#) under viser PSO-algoritmen og verdiene for de ulike algoritme parameterne som er brukt i optimaliseringen.

*Tabell 11 Verdier til algoritme parametere*

<b>Algoritme parametere</b>	<b>Verdi</b>
Main	PSOCC
Neighbourhood topology	Von Neumann
Neighbourhood size	5
Number of particles	10
Number of generations	20
Seed	50
Cognitive acceleration	2.8
Social acceleration	1.3
Max velocity gain continuous	0.5
Max velocity discrete	4
Constriction gain	0.5



### 3.5.6 LCC

Livssyklus kostnaden er en av objektive funksjonene for optimalisering ved renovering av referansebygget og er beregnet etter metode forslått av tidligere studie [12]. Den totale funksjonen for kostnad som skal optimaliseres med bruk av GenOpt er vist under og representerer den absolutte kostnaden for bygget. Den består av kostnader knyttet til blant annet investering, operasjon, rivning og eventuelle utskiftninger. Vedlegg B viser alle kostnadene og hvor de er funnet.

$$LCC = \sum_{i=0}^{ni} (Ci + Li) \times \left( \sum_{j=0}^{mj} Ai, j \right) + Df \times Y \left( (S + W) \times CH + (E \times CE) \right) \quad (4)$$

Hvor:

- $i$  = Antall av materiale
- $C_i$  = Material kostnad [kr/m<sup>2</sup>]
- $L_i$  = Materialets avfall, transport, konstruksjon og rivning kostnadskoeffisient [kr/m<sup>2</sup>]
- $A_{i,j}$  = Materialets areal [m<sup>2</sup>]
- $j$  = Antallet av overflater av  $i$  materialet
- $D_f$  = Diskonteringsfaktor
- $Y$  = Antall år
- $S$  = Romoppvarming energi [kWh]
- $W$  = Oppvarming av tappevann energi [kWh]
- $CH$  = Kostnad grunnet romoppvarming og tappevann [kr/kWh]
- $E$  = Elektrisitet energi [kWh]
- $CE$  = Kostnad grunnet elektrisitet [kr/kWh]

Det er flere grunner til at en LCC vurdering er viktig å gjennomføre ved vurdering av en løsning. Hovedårsaken er at en løsning ofte er sammensatt og vil kunne ha flere påvirkninger over en lengre periode. Som for eksempel vil et bygg med vinduer med lave U-verdier føre til redusert energibruk. Men det er usikkert om det vill kompensere for den dyre investeringskostnaden, i tillegg har vinduene en kortere levetid enn andre designløsninger. Derfor er det viktig å vurdere LCC med en passende analyseperiode. Som vil dekke levetiden til designløsningene, men samtidig ikke er for lang grunnet usikkerhet knyttet til energipriser sin utvikling i fremtiden. En vanlig vurdering er at tykkere isolasjon med lavere U-verdi vil være lønnsomt, men dette kan ved et punkt bli ugunstig eller lite besparende. Studiet vil derfor finne den kombinasjonen som er mest besparende over levetiden til bygget, hvor også komforten til brukerne er tatt hensyn til.

Material kostnaden består av investeringskostnad og den totale årskostnaden over levetiden til løsningen. Årskostnaden er forutsatt til å være kostnaden for vedlikehold av løsningen. Material kostnaden er derfor kostnaden av de ulike designløsningene som isolasjon- og vindustypene. Material kostnaden,  $C_i$ , blir beregnet med formelen under. Ved utskiftning blir kostnaden for investering lagt til igjen. Dette er gjort for vinduer som har en kortere levetid enn de andre løsningene.

$$C_i = \text{Investeringskostnad} + \text{Årskostnad} * 60 \text{ Levetid} \quad (5)$$

Materialets kostnad grunnet avfall, transport, konstruksjon og rivning, er lagt til med den selve material kostnaden. Også denne kostnaden blir lagt til ved endt levetid, verdiene er gitt per m<sup>2</sup> og blir derfor multiplisert med deres areal, A<sub>i</sub>.

For operasjonskostnaden er det beregnet en netto nåverdi for hele byggets antatte levetid, gjort i henhold til NS 3454:2013. Grunnet ulik kostnad for fjernvarme og elektrisitet er det valgt å benytte ulik pris for energiforsyningen, men samme diskonteringsfaktor. Pris for fjernvarme (CH) og elektrisitet (CE) er hentet fra Statistisk Sentralbyrå [56, 57] og det årlige energiforbruket (S, W, E) er simulert. Grunnet en lang analyseperiode blir det tatt høyde for eskalering og inflasjon av energiprisene. Det ble beregnet en kalkulasjonsrente r=0,04 og diskonteringsfaktor på Df=0.22. Formlene for beregningene er vist under og Tabell 12 er innputtverdiene for LCC beregningen.

$$LCCe = Df \times Y \left( (S + W) \times CH + (E \times CE) \right) \quad (6)$$

Hvor:

- LCCe = Operasjonskostnad [kr]
- Df = Diskonteringsfaktor
- Y = Antall år
- S = Romoppvarming energi [kWh]
- W = Oppvarming av tappevann energi [kWh]
- CH = Kostnad grunnet romoppvarming og tappevann [kr/kWh]
- E = Elektrisitet energi [kWh]
- CE = Kostnad grunnet elektrisitet [kr/kWh]

$$Df = \frac{1 - (1 + r)^{-N}}{r}$$

Hvor:

- Df = Diskonteringsfaktor
- r = Kalkulasjonsrente
- N = Levetid

$$r = \frac{1}{(1 + e)} * \left[ \frac{r_n - i}{(1 + i)} - e \right] \quad (7,8)$$

Hvor:

- r = Kalkulasjonsrente
- r<sub>n</sub> = Nominelle renten
- e = Relativ energiprisendring
- i = Generell prisendring

Tabell 12 Innputtverdier for LCC-beregning

Parametere for LCC-beregning	Verdi	Enhet [-]
Levetid, N	60	[år]
Inflasjon, i	2	[%]
Relativ energiprisendring, e	1	[%]
Energipris, CH CE	0.86, 0.99	[kr/kWh]
Nominell rente, rn	7	[%]

### 3.5.7 LCCF

Livssyklus karbonfotavtrykket er den andre objektive funksjonen for optimalisering ved renovering av referansebygget og metoden for beregningen er basert på tidligere studie [12]. Funksjonen for karbonfotavtrykket er vist under og skal også bli optimalisert med GenOpt. Den tar hensyn til materialene sitt bundet utslipp og byggets operasjonsutslipp fra bruk av elektrisitet og fjernvarme.

Vedlegg B viser utslippet for de ulike løsningene og hvor de er funnet.

$$LCCf = \sum_{i=0}^{ni} ((Ki + Mi) \times (\sum_{j=0}^{mj} Ai, j)) + Y ((S + W) \times EH) + (E \times EE) \quad (9)$$

Hvor:

- $i$  = Antall av materiale
- $Ki$  = Materialets bundet CO<sub>2</sub>-utslipp [kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>]
- $Mi$  = Materialets avfall, transport, konstruksjon og rivning CO<sub>2</sub>-koeffisient [kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>]
- $Ai$  = Materialets areal [m<sup>2</sup>]
- $j$  = Antallet av overflater av  $i$  materialet
- $Y$  = Antall år
- $S$  = Romoppvarming energi [kWh]
- $W$  = Oppvarming av tappevann energi [kWh]
- $EH$  = CO<sub>2</sub> utslipp grunnet romoppvarming og tappevann [kgCO<sub>2</sub>/kWh]
- $E$  = Elektrisitet energi [kWh]
- $EE$  = CO<sub>2</sub> utslipp grunnet elektrisitet [kgCO<sub>2</sub>/kWh]

I dette studiet er det benyttet en metode som skal vurdere hele livssyklusutslippet for en løsning, men begrenser seg til å ikke vurdere eventuelle ombruk av materialer. Grunnet økt fokus på miljø og reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp har viktigheten av effektive metoder for LCCf vurdering aldri vært større. Metoden som er foreslått i dette studiet vil kunne sammenligne utslippet til flere løsninger og være tilpasset for bruk av egendefinerte verdier for utslippet. På denne måten vil metoden kunne bidra for bransjer å imøtekomme dagens og fremtidige miljøkrav.

Metoden i studiet vurderer utslippet knyttet til materialvalg og byggets energibruk. Material utslippet blir lagt til dets utslipp grunnet rivning, transport og konstruksjon. Dette totale utslippet blir multiplisert med bruken av materialet, altså arealet. Utslipp av rivning er tatt hensyn til ved renovering og forutsatt lik ved endt levetid. For operasjonsutslipp blir det simulerte energibruket av fjernvarme og elektrisitet multiplisert med koeffisienter for klimagassutslippet ( $EH$  og  $EE$ ). Det er knyttet stor spennvidde til disse verdiene avhengig av lokasjon, andel av energikilder og leverandør. For klimagassutslippsfaktoren  $EH$  til fjernvarme er det benyttet 0.22 kg CO<sub>2</sub>/kWh, basert på nordiske studier [58]. Koeffisienten  $EE$  er det gjennomsnittlige direkte klimagassutslippet for bruk av strøm i Norge, 0.017 kg CO<sub>2</sub>/kWh [59]. En nærmere vurdering til disse verdiene ble funnet utenfor rammene for studiet.

### 3.5.8 Vektet summetode

En metode for å kunne gjennomføre en multi-objektiv optimalisering på er å benytte seg av «vektet summetode» [60]. Metoden gjør et multi-objektivt funksjonelt problem om til et enkelt-objektivt bestående problem. Slik kan optimaliserings programmet GenOpt optimalisere ved hensyn til både kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. En av fordelene med denne metoden er at brukeren kan vektlegge viktighet av kostnad eller CO<sub>2</sub>-utslipp ved å tilpasse vektingsfaktorene.

For å kunne benytte seg av metoden trenger man min og maks verdiene for begge objektiv funksjonene. Derfor blir det først optimalisert bare for kostnad og deretter CO<sub>2</sub>-utslipp. Det ble valgt å bruke min og maks verdiene fra minimaliseringen av objektiv funksjonene. Ved å bruke GenOpt kunne også løsningene bli maksimert, men dette ble funnet for tidkrevende. Formlene under viser hvordan min og maks verdiene er benyttet med den beregnede kostnaden og CO<sub>2</sub>-utslippet for hver løsning.

$$Fi(LCC) = \frac{f_i(LCC) - \min_{f_i}(LCC)}{\text{maks}_{f_i}(LCC) - \min_{f_i}(LCC)} \quad (10)$$

Hvor:

- $F_i(LCC)$  = Totale funksjonsverdi for kost [kr]
- $f_i(LCC)$  = Beregnet kost for hver løsning [kr]
- $\min_{f_i}(LCC)$  = Beregnet min verdi for kostnad [kr]
- $\text{maks}_{f_i}(LCC)$  = Beregnet maks verdi for kostnad [kr]

$$Fk(LCCf) = \frac{f_k(LCCf) - \min_{f_k}(LCCf)}{\text{maks}_{f_k}(LCCf) - \min_{f_k}(LCCf)} \quad (11)$$

Hvor:

- $F_k(LCCf)$  = Totale funksjonsverdi for CO<sub>2</sub>-utslipp [kgCO<sub>2</sub>eq]
- $f_k(LCCf)$  = Beregnet CO<sub>2</sub>-utslipp for hver løsning [kgCO<sub>2</sub>eq]
- $\min_{f_k}(LCCf)$  = Beregnet min verdi for CO<sub>2</sub>-utslipp [kgCO<sub>2</sub>eq]
- $\text{maks}_{f_k}(LCCf)$  = Beregnet maks verdi for CO<sub>2</sub>-utslipp [kgCO<sub>2</sub>eq]

I dette studiet er det forutsatt både lik og ulik vektning mellom kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. Derfor er vektingsfaktoren satt til å være 0.3, 0.5, og 0.7, som vist under.

$$\sum_{i=1}^k \omega = (0.3, 0.5, 0.7) \quad (12)$$

Hvor:

- $\omega$  = Vektingsfaktor [-]

Den enkelt bestående funksjonen som blir optimalisert med GenOpt er vist under, som er summen av funksjonsverdiene til objektiv funksjonene multiplisert med deres vektning. På denne måten har den multi-objektive problemstillingen blitt redusert til et enkelt bestående problem som er håndterlig for GenOpt.

$$G(LCC, LCCf) = \sum_{i=1}^k \omega F_i(LCC) + \omega F_k(LCCf) \quad (13)$$

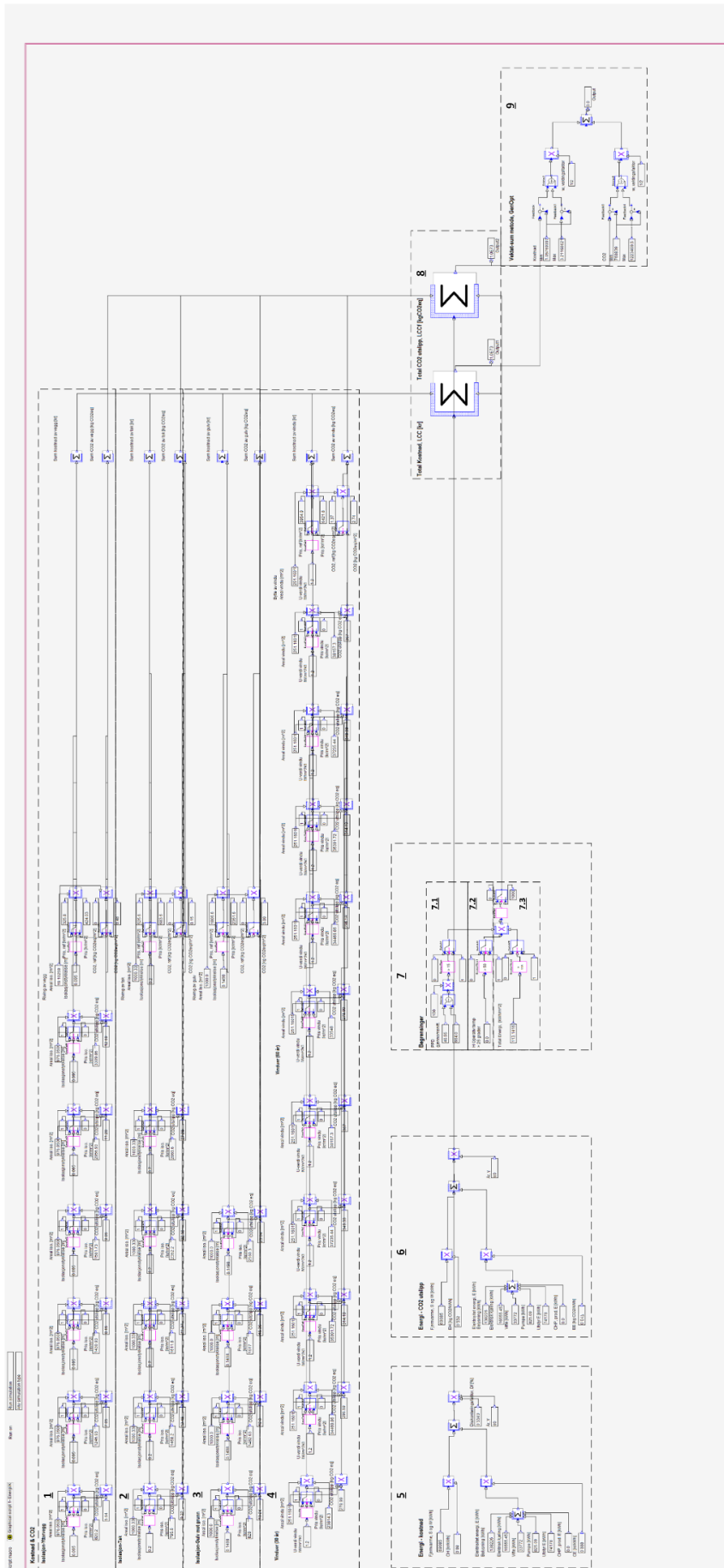
Hvor:

- $G(LCC, LCCf)$  = Totale vektet funksjonsverdi for kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp [-]
- $\omega$  = Vektingsfaktor [-]
- $F_i(LCC)$  = Totale funksjonsverdi for kostnad [kr]
- $F_k(LCCf)$  = Totale funksjonsverdi for CO<sub>2</sub>-utslipp [kgCO<sub>2</sub>eq]

### 3.5.9 Grafisk skript

Det er utviklet et eget grafisk skript i IDA ICE for å definere de ulike løsningene sine kostnader og CO<sub>2</sub>-utslipp. Ved å bruke funksjonen «Graphical Script» kan ulike bygningsparametere og resultater fra simuleringer bli lagt inn. Disse innputtene kan bli modellert med ulike matematiske funksjonsblokker. På denne måten kan brukeren lage en ønsket output, uten å lære avansert programmering. Outputen fra skriptet blir lagt til funksjonen «Parametric runs», hvor definerte innputt og outputs kan bli optimalisert. Her defineres også et variasjonsområde som enten bestemmes med enkle og diskreverdier eller bare valgte elementer. For det grafiske skriptet er det benyttet allerede diskuterte håndberegnete eller hentete inndata, som  $Df=0.22$ ,  $Y=60$  år,  $CH=0.86$  kr/kWh,  $CE=0.99$  kr/kWh,  $EH= 0.225$  kgCO<sub>2</sub>/kWh og  $EE = 0.017$  kgCO<sub>2</sub>/kWh

[Figur 11](#) viser oppbyggingen til hele det grafiske skriptet og tall definerer de ulike delprosessene som blir nærmere forklart. Figuren skal vise hvordan de ulike prosessene er satt sammen og illustrere kompleksiteten til skriptet. [Vedlegg G](#) er et større og bedre bilde av skriptet, men hvor tall til energibruk ikke er oppdatert. Det henvises også til vedlagt bilde.

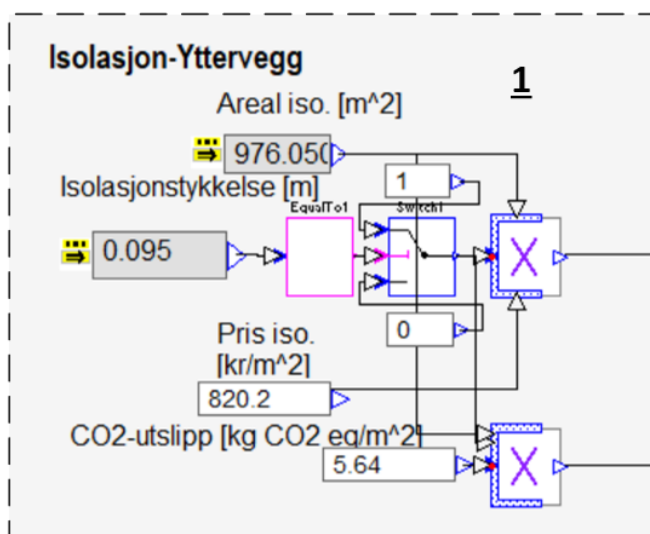


Figur 10 Grafisk skript

### 3.5.9.1 Prosessbeskrivelse av Grafisk skript

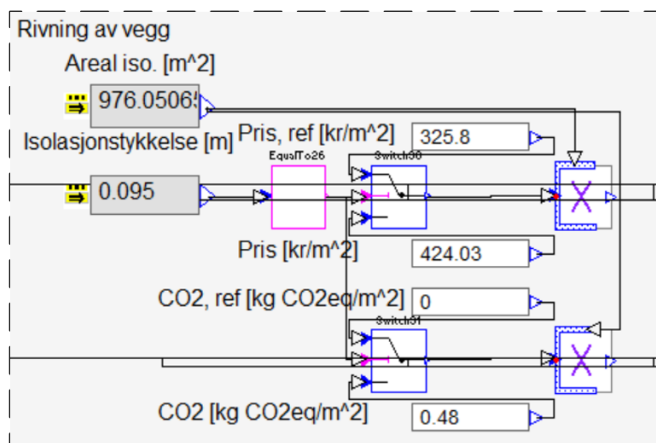
#### 1. Isolasjonstykkelse-Yttervegg

Isolasjonstykkelsen er her satt inn som innputt og de ulike tykkelsene som det simuleres for vil bli sendt videre til equal-blokken. Disse equal-blokkene er satt til å bare være de ulike tykkelsene og vil derfor bare sende signal videre hvis verdien er lik. Når verdien er lik vil bryter-blokken sende en verdi på en som vil sørge for at areal blir multiplisert med den gitte prisen. Denne verdien på en vil også bli sendt til multipliserer-blokken for CO<sub>2</sub>-utslipp. Disse to verdiene blir sendt videre til total summen, rute 8. [Figur 11](#) under viser metoden for en av de fem isolasjonstykkelsene.



Figur 11 Metode for en isolasjonstykkelse i grafisk skript

Ved rivning av yttervegg vil det være ulik pris og CO<sub>2</sub>-utslipp for referanseutgangspunktet og ved tiltak. Derfor vil bryter-blokken sende en annen verdi enn null ved en annen isolasjonstykkelse enn referanseutgangspunktet. På samme måte blir det sendt signal til bryter-blokken for CO<sub>2</sub>-utslipp. Verdiene sendes til rute 8. [Figur 12](#) under viser metoden for beregning av kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp for rivningen av yttervegg.



Figur 12 Metode for rivning av yttervegg i grafisk skript

## 2. Isolasjonstykkelse-Tak

Isolasjonstykkelsen er her satt inn som inntutt og følger samme metode som for isolasjonstykkelse til yttervegg. Endring av totalareal, priser og CO<sub>2</sub>-utslipp er gjort, med hensyn for tak. Verdiene sendes til rute 8.

## 3. Isolasjonstykkelse-Gulv mot grunn

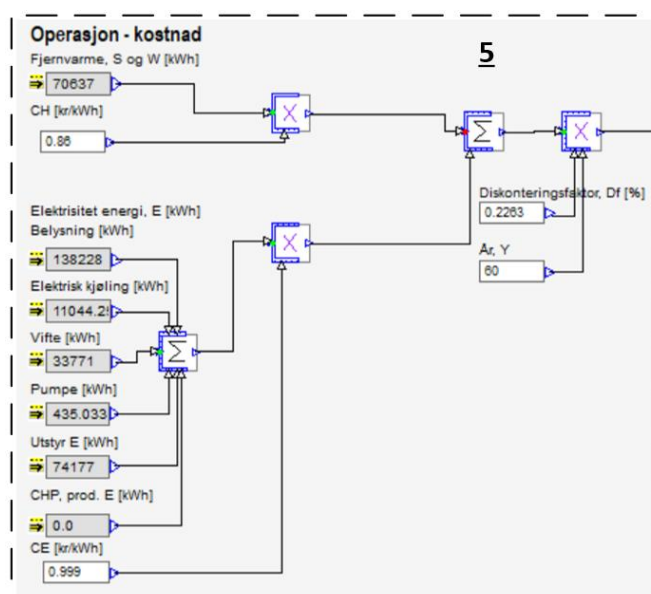
Isolasjonstykkelsen er her satt inn som inntutt og følger samme metode som for isolasjonstykkelse til yttervegg. Endring av totalareal, priser og CO<sub>2</sub>-utslipp er gjort, med hensyn for gulv mot grunn. Det er også tatt hensyn til klargjøring for gravearbeid i prisen for rivning. Verdiene sendes til rute 8.

## 4. Vindu

Den totale U-verdien for vindu er her satt inn som inntutt og de ulike verdiene som det simuleres for blir videre sendt til equal-blokkene. Equal-blokkene er satt til å være de ulike forhåndsbestemte U-verdiene. Grunnet en levetid på 30 år, er nåverdien for pris og CO<sub>2</sub>-utslipp etter 30 år og 60 år lagt inn. Metoden for vinduer vil videre være tilsvarende som for isolasjonstykkelsene. Verdiene sendes til rute 8.

## 5. Operasjonskostnad

Energibruken for fjernvarme og elektrisitet er her satt inn som inntutt og blir multiplisert med sin pris. De ulike energipostene er definert i skriptet for å bestemme hvilke av postene som går til elektrisitet og fjernvarme. Den totale kostnaden blir multiplisert med diskonteringsfaktoren og analyseperioden. Verdiene sendes til rute 8. [Figur 13](#) viser metoden for beregningen.

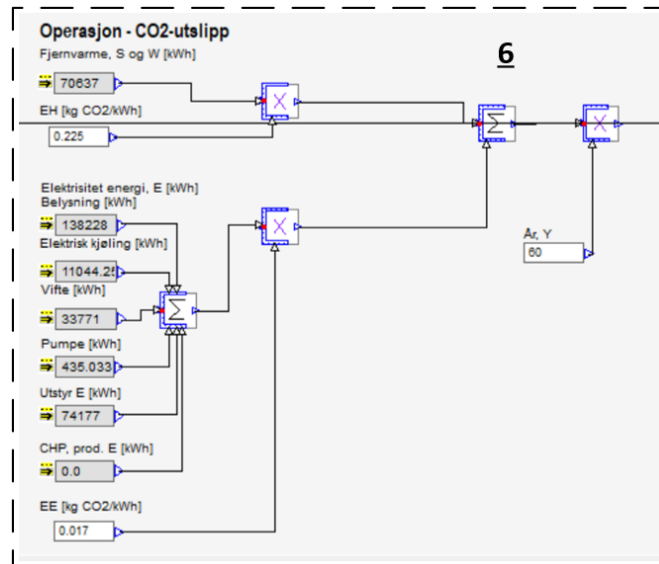


Figur 13 Metode for operasjonskostnad i grafisk skript



## 6. Operasjonsutslipp

Energibruken for fjernvarme og elektrisitet er her satt inn som inntutt og blir multiplisert med sin gitte utslippskoeffisient. Hvor totalsummen av utslippet grunnet energibruk for et år blir multiplisert med analyseperioden. Verdierne sendes til rute 8 og metoden er vist med [Figur 14](#).



Figur 14 Metode for CO<sub>2</sub>-utslipp av operasjon i grafisk skript

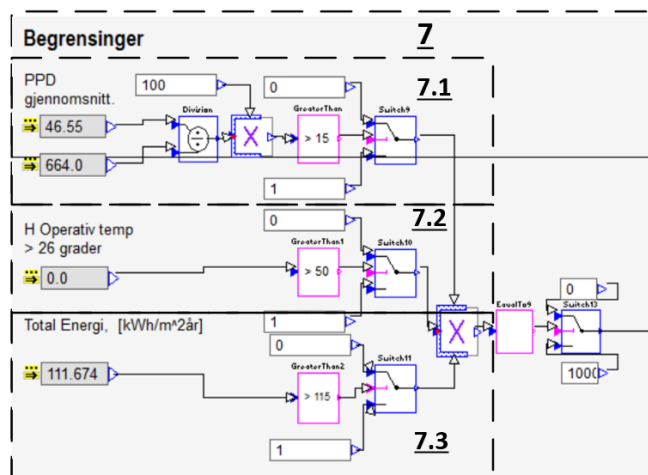
## 7. Begrensninger

7.1 PPD gjennomsnitt for kritisk rom er satt som begrensning og skal ikke være over 15%. Hvis den beregnede PPD gjennomsnitt er over, vil bryter-blokken sende en verdi på null til multipliserer-blokken.

7.2 Den operative temperaturen for samme rom skal ikke overstige 26°C i over 50h da vil bryter-blokken sende en verdi på null til multipliserer-blokken.

7.3 Det totale energibruken til bygget skal ikke overstige TEK17 kravet for energibruk til kontorbygg på 115 kWh/m<sup>2</sup>år. Da vil bryter blokken sende en verdi på null til multipliserer-blokken.

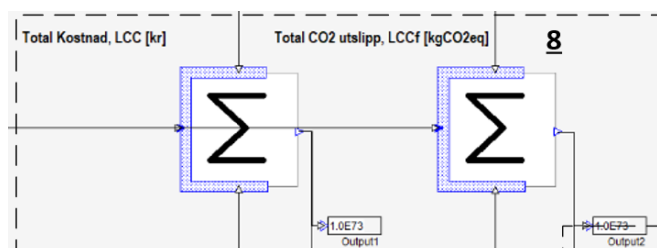
Hvis multipliserer-blokken får en verdi på null vil bryter-blokken sende et stort tall videre til rute 8. Dette er for å ugyldiggjøre løsningene som ikke tilfredsstiller komfortanbefalingene og ytelseskravene. Metoden for begrensninger er vist med [Figur 15](#) under.



Figur 15 Metode for begrensninger i grafisk skript

### 8. Total-Kostnad/CO<sub>2</sub>-utslipp

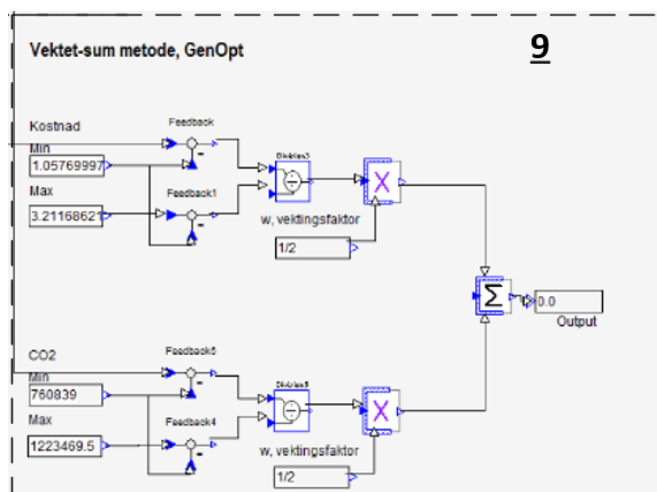
Dette er total summen av kostnader og CO<sub>2</sub>-utslipp for investering, vedlikehold, operasjon og rivning. Outputene er videre lagt til i «Parametric runs» for å bli minimalisert. Verdiene blir sendt til rute 9 og metoden er vist med Figur 16.



Figur 16 Metode for kostnad/CO<sub>2</sub>-utslipp i grafisk skript

### 9. Vektet summetode

Denne delen får resultatene fra rute 8 og bruker allerede funnet min og maks verdier for kostnader og CO<sub>2</sub>-utslipp til en enkel output. Denne outputen legges også til i «Parametric runs» og er den siste outputen for minimalisering med GenOpt. Figur 17 viser metoden i det grafiske skriptet.



Figur 17 Metode for vektet summetode i grafisk skript

### 3.6 Evaluering av metode

Metoden i studiet bestod av flere viktige prosesser. Forarbeidet var kanskje den viktigste prosessen fordi det var her hele grunnlaget for studiet ble lagt. I denne prosessen ble det bestemt hva fokuset i studiet skulle være og hva man ønsket å oppnå. Det ble valgt å benytte gode og nøyaktige verktøy for studiet som IDA-ICE og GenOpt. I energisimuleringsprogrammet ble det utviklet en bygningsmodell, som representerer et vanlig kontorbygg i Norge. Simuleringene av referansebygget skal dokumentere at TEK 17 krav er tilfredsstilt og at termisk komfort er ivaretatt. Ved å benytte grafisk skript ble det forslått en metode for å identifisere de optimale løsningene for renovering av bygget, med hensyn til både kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. Dette var hensikten med studiet og derfor er metoden vurdert som egnet å anvende i studiet.

På en annen side krever metoden bruk av avanserte programmer som kan være utfordrende i starten. Dette er viktig å presisere, fordi det fører til at det kreves en del tid før de første resultatene er oppnådd. Som er en metodens største svakheter, hvor også selve optimaliseringsprosessen kan ta flere dager avhengig av kompleksiteten til modellen, inndataen og benyttet optimaliserings algoritme. For dette studiet brukte IDA-ICE og GenOpt fem til seks dager for å finne den minimale verdien til objektivet. Derimot ble det fortsatt funnet flere styrker med metoden. Som for eksempel at nøyaktigheten av resultatene den gir vil begrense seg til brukeren og at optimaliseringsprosessen er automatisert.

## 4 Resultater og Diskusjon

For å kunne foreta en vurdering av de ulike optimaliserings scenarioene blir det simulert en dynamisk energisimulering av referansebygget. Simuleringen legger grunnlag for videre beregning av kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. På denne måten har resultatene fra optimaliseringen referansedata for kostnad og CO<sub>2</sub>-utlipp som det kan sammenlignes mot. Hensikten med denne sammenligningen er å finne hvilke løsninger som gir lavest livssyklus-kostnader (LCC), livssyklus-karbonfotavtrykk (LCCf) og hvor ikke definerte anbefalinger til termisk komfort brytes. I tillegg blir dagslysforholdene for referansebygget før og etter tiltak diskutert. Før resultatene blir presentert er det viktig å presisere at energibruk er per år og kostnader og CO<sub>2</sub>-utslipp er over en analyseperiode på 60 år.

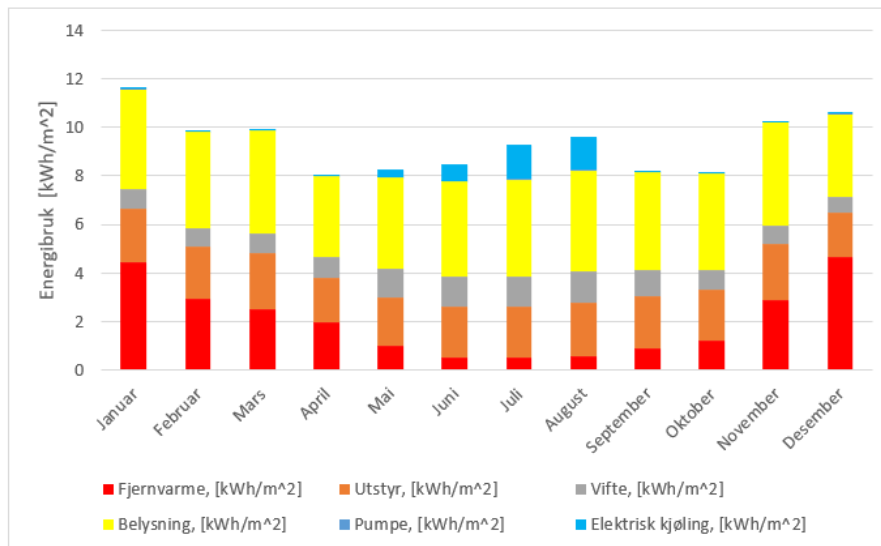
### 4.1 Energibruk av referansebygg

Referansebygget ble modellert med utgangspunkt for å tilfredsstille krav til energieffektivitet i henhold til TEK 17 og har derfor ikke et veldig høyt energibruk. Det simulerte energibruket ble 111,7 kWh/m<sup>2</sup>år, men som vil fortsatt gi mulighet for videre reduksjon. Bygget har som beskrevet et generelt effektivt ventilasjonssystem og varmesystem, som sørger for oppvarming og kjøling av bygget. Dette er noen av de bakenforliggende årsakene til at bygget har simulert et lavt behov for oppvarming og kjøling. Resultatene av energisimuleringen ga et spesifikt kjølebehov på 11,18 kWh/m<sup>2</sup>år og oppvarmingsbehov på 16,08 kWh/m<sup>2</sup>år. Resultatene er vist i [Tabell 13](#) under.

*Tabell 13 Energibruk av referansebygning*

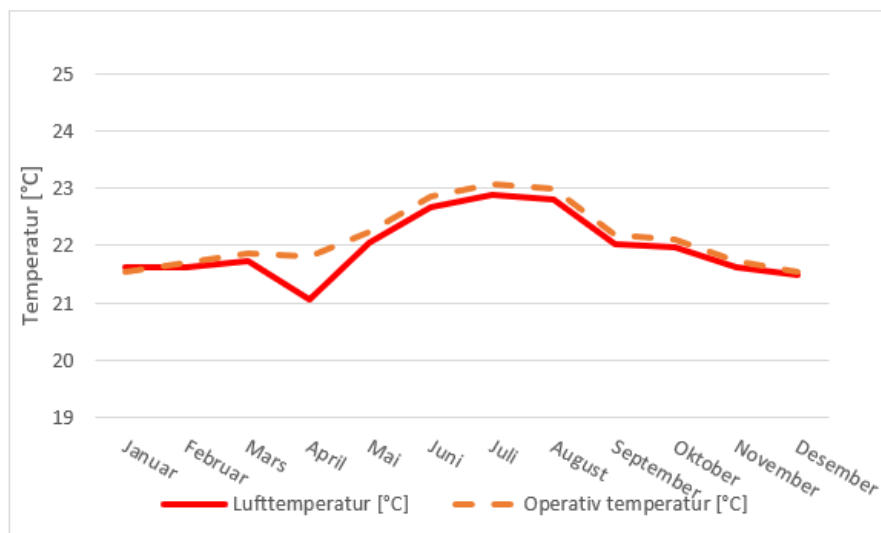
Parameter	Spesifikt Kjølebehov [kWh/m <sup>2</sup> år]	Spesifikt Oppvarmingsbehov [kWh/m <sup>2</sup> år]	Totalt Energibruk [kWh/m <sup>2</sup> år]
Referanse bygning	11,18	16,08	111,7

Referansebygget har en størst andel energi som går til fjernvarme og belysning. Bruken av fjernvarme synker ved sommer, grunnet lavere behov for oppvarming og større behov for kjøling. Ved sommermånder er det et lite behov som går til oppvarming av tappevann. De andre energipostene holder seg ganske stabile igjennom året, hvor energi til vifter er noe redusert ved kaldere måneder. [Figur 18](#) viser den månedlige energibruken av de ulike energipostene igjennom året.



Figur 18 Månedlig energibruk av referansebygget

For å vurdere temperaturen for referansebygget er valgt å bruke det kritiske rommet. Denne sonen er vist i Figur 7 og er sonen med fare for høyest temperatur. Figur 19 viser gjennomsnittslufttemperatur og operativtemperatur igjennom et år. Den viser små forskjeller i temperatur, hvor luft- og operativ temperatur faller i april måned. Referansebygget er simulert med konstant settpunkt for ventilasjons temperatur på 16°C og sonene er satt til å variere fra 21 til 24 °C. Som er årsakene til at både luft og operativ temperatur holder seg imellom disse settpunktene.



Figur 19 Månedlig temperaturer kritisk rom i referansebygget

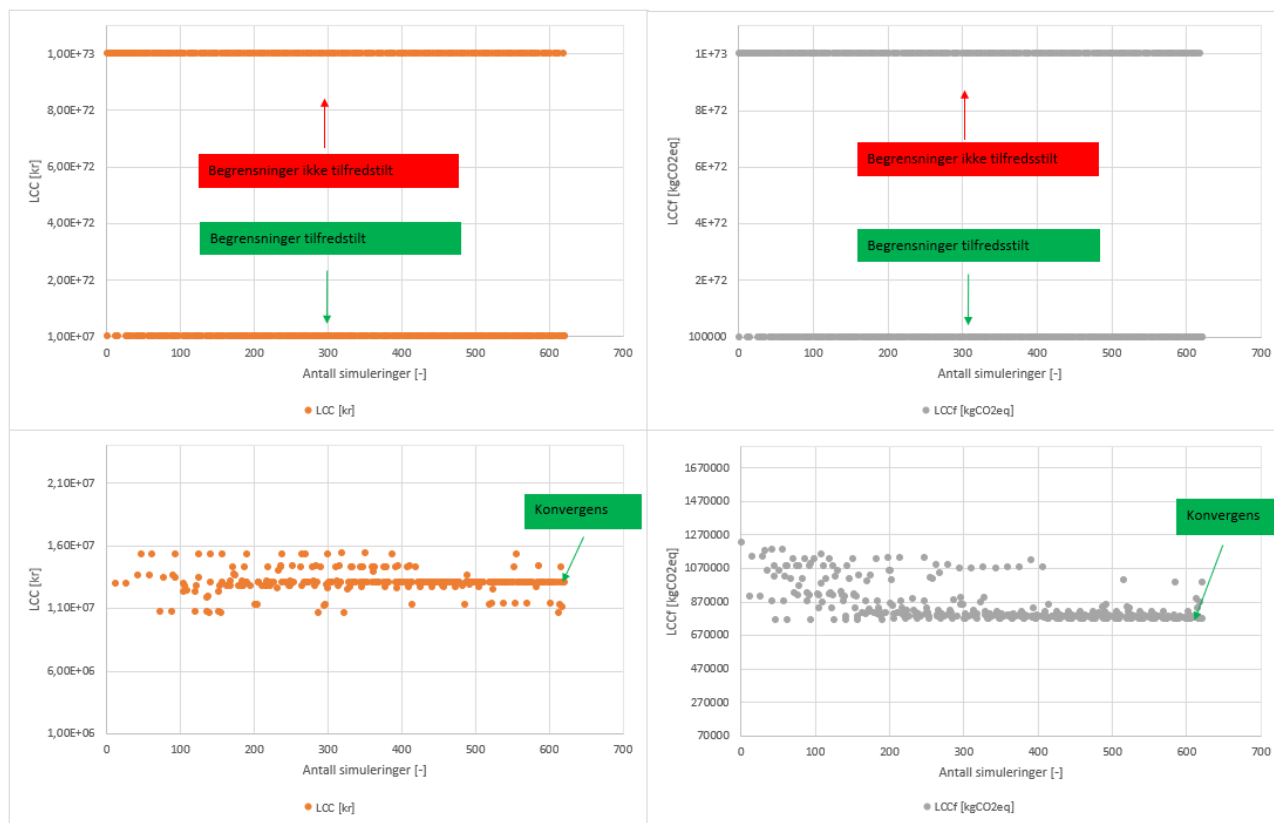
## 4.2 Optimaliseringsresultater

Optimaliseringsresultatene for referansebygget vil inneholde påvirkningen av begrensninger, hva de optimale løsningene består av og energibruk og temperatur i de ulike scenarioene. Resultatene til scenarioene blir til slutt sammenlignet og diskutert.

### 4.2.1 Begrensninger og konvergens

For hvert scenario ble det gjennomført over 600 simuleringer ved en optimaliseringsprosess. Som resulterte i en stor mengde data for analysering. Resultatene for alle de ulike scenarioene ville ha et stort skille grunnet de definerte begrensningene som ble satt i det grafiske skriptet. Derfor vil det være punkter som enten har realistiske objektive verdier eller er alt for store, avhengig om begrensningene er tilfredsstillt. Figur 20 viser disse to områdene av punkter, hvor antallet simuleringer som er gjort er på x-aksen og objektiv verdien er på y-aksen.

Optimaliseringsprogrammet vil etter flere gjennomførte simuleringer finne løsninger med både lavere kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. Mot slutten av optimaliseringsprosessen vil forskjellen mellom løsningene være liten, som betyr at GenOpt begynner å finne en konvergens. Konvergens er også vist med Figur 20. Dermed har programmet funnet den beste kombinasjonen av parametere. Alle scenarioene vil ha felles type grafer, men noe ulikt resultat av objektive verdier. Verdiene for kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp varierer fra 11 og 16 millioner kroner og 670 000 og 1 270 000 kgCO<sub>2</sub>eq.

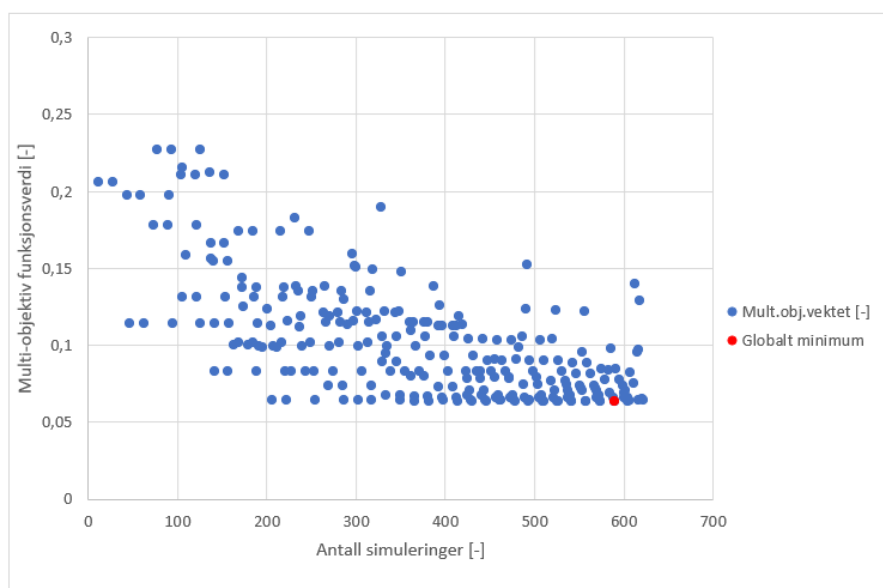


Figur 20 Påvirkning av begrensninger og konvergens ved optimalisering

## 4.2.2 Optimale løsninger

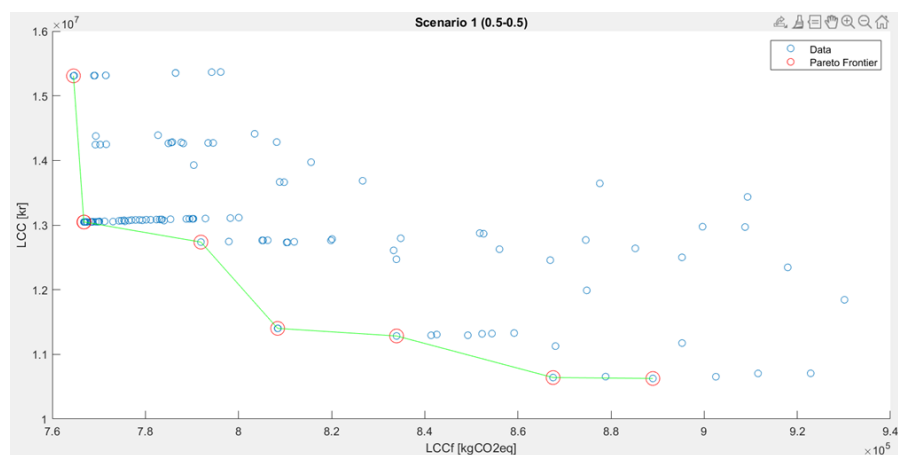
### 4.2.2.1 Scenario 1

Ved dette scenarioet vurderes det ved en lik vektning av kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. Hvor man ønsker å finne resultatet som gir både lavest kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp. For å finne denne løsningen må det globale minimumet bli funnet. Dette er punktet som har lavest verdi av den multi-objektive funksjonsverdien. På grunn av at det er gjennomført mange simuleringer kan det være flere globale minimumer, men disse ville ha lik kombinasjon av parametere og derfor er det bare presentert en. I dette scenarioet ble det første global minimum funnet etter 589 simuleringer. Punktet er vist på [Figur 21](#) under.



Figur 21 Globalt minimum for Scenario 1

De optimale løsningene kan bli funnet ved å identifisere pareto fronten for løsningene. Dette er gjort ved å legge objektive for optimalisering på x og y-aksene. Hvis det blir valgt en annen løsning enn en som er på linjen vil det føre til en dårligere verdi av enten kostnad eller CO<sub>2</sub>-utslipp. For dette scenarioet er pareto fronten vist med [Figur 22](#) under.



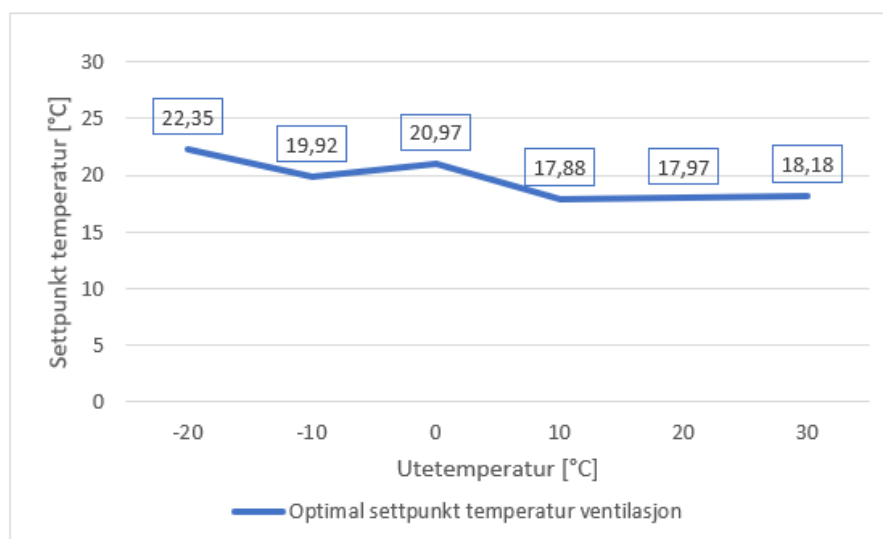
Figur 22 Pareto front Scenario 1

Det er valgt å presentere de tre optimale løsningene for scenarioet. For alle løsningene ble det vurdert at det optimale vinduet vil være det med lavest U-verdi. Grunnen til dette kan være reduseringen av energi som valget fører til og som vil samtidig bety at investeringskostnaden og utslippet ikke ble funnet for stor. Dette gjelder også for isolasjonstykkelsen til yttervegg. Resultatene viste også at det er foretrukket å benytte en isolasjonstykkelse for tak på 230 mm og beholde samme isolasjonstykkelse for gulv. Den beste metoden for solskjerming ble funnet til å være med bruk av M6544. Resultatene er vist i [Tabell 14](#).

Tabell 14 Optimalte løsninger Scenario 1

Løsning	Vindu	Yttervegg Iso. tykkelse	Tak Iso. tykkelse	Gulv mot grunn Iso. tykkelse	Solskjerming
1)	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	450mm	230mm	200mm	Markisolette M6544
2)	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	450mm	300mm	200mm	Markisolette M3911
3)	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	450mm	300mm	200mm	Markisolette M6544

Alle de presenterte optimale løsningene hadde tilnærmet likt resultat av settpunkt for ventilasjons temperaturen. Derfor er det valgt å presentere settpunkt temperaturene bare for den beste løsningen. Settpunkt temperaturen vil variere avhengig av utetemperaturen og være et sted på det bestemte variasjonsområdet. [Figur 23](#) viser grafen for den optimale settpunkt temperaturen i scenarioet. Hvor settpunkt temperaturen kan variere mellom 22,35°C og 17,88°C. Den viser også at ved 10°C til 20°C utetemperatur er settpunkt temperatur tilnærmet konstant 18°C.

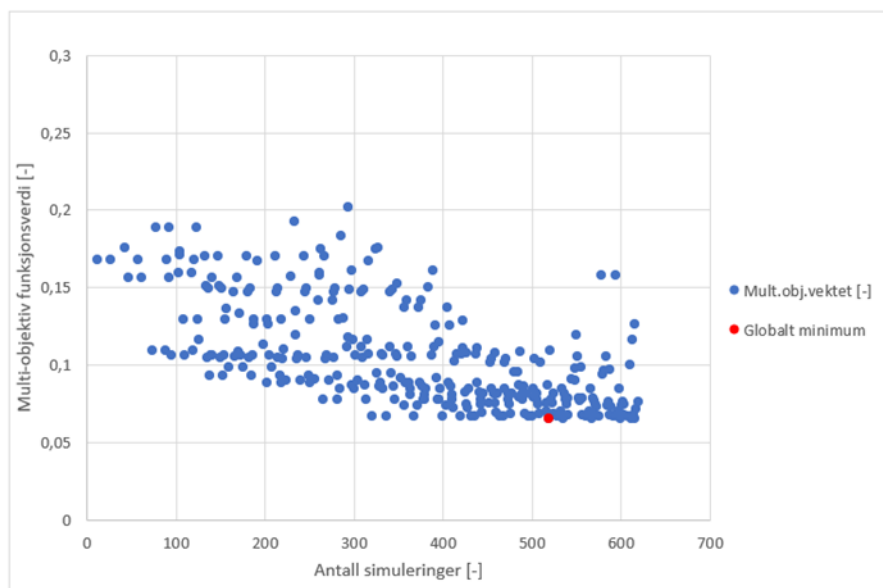


Figur 23 Graf for optimal settpunkt temperatur for Scenario 1



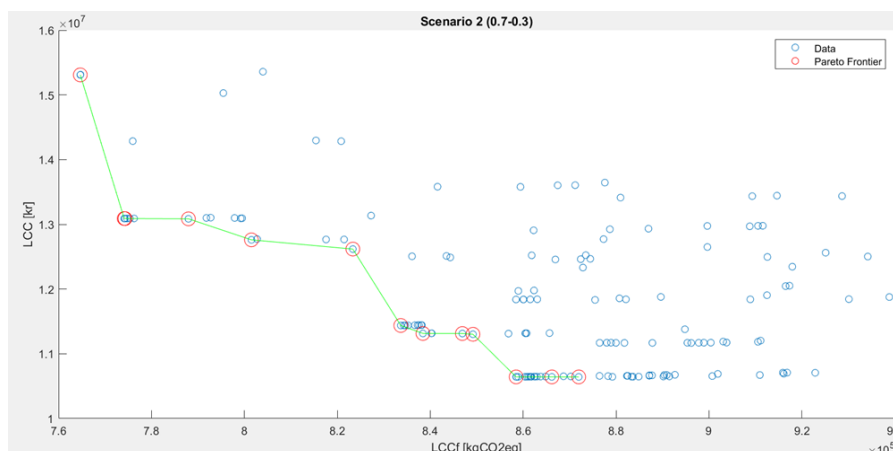
#### 4.2.2.2 Scenario 2

I dette scenarioet er resultatene basert på en vektlegging av kostnad. Det betyr at de optimale løsningene skal være mest lønnsomme, men samtidig må de akseptere et større CO<sub>2</sub>-utslipp. Etter at optimaliseringsprosessen var gjennomført, ble det funnet et globalt minimum etter 519 simuleringer. Med dette antallet simuleringer var det i dette scenarioet det globale minimumet ble funnet raskest. Noe som kan indikere at det var en løsning som ville skille seg ut som mest besparende i forhold til de andre. Dette globale minimumet er vist med [Figur 24](#).



Figur 24 Globalt minimum for Scenario 2

For dette scenarioet er pareto fronten vist med [Figur 25](#) og hvor man ser at de fleste løsningene er ved en lavere kostnad. De identifiserte optimale løsningene vil ligge på linjen og løsningen som ga det globale minimumet på forrige figur vil være lokalisert der.



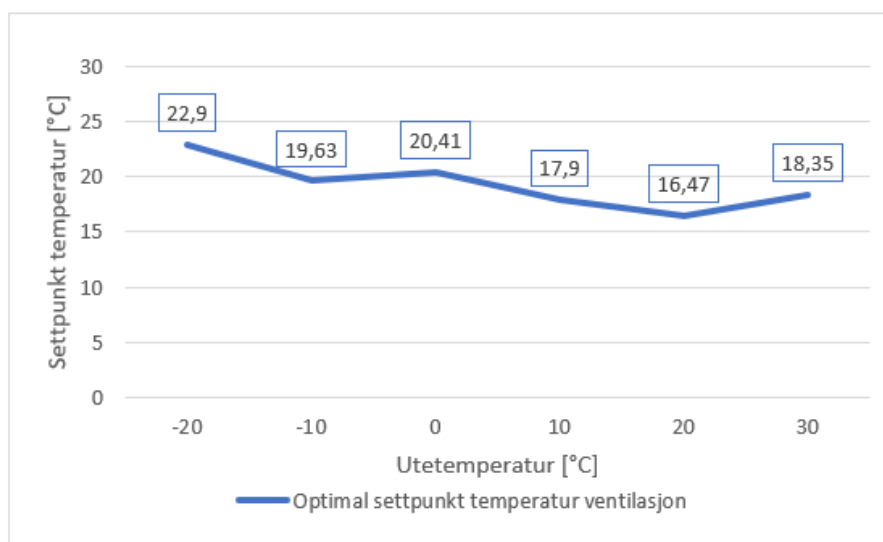
Figur 25 Pareto front Scenario 2

På samme måte som for de andre scenarioene er det valgt å presentere de tre beste løsningene. Den anbefalte vindustypen er den med lavest U-verdi. For yttervegg er tendensen at det er anbefalt å bruke den billigste isolasjonstykkelsen på 200mm. Dette virker fornuftig med tanke på at scenarioet vektlegger kostnad. Men det er samtidig interessant siden det kan føre til større energibruk. Andre forslag til løsninger er presentert i [Tabell 15](#) under.

Tabell 15 Optimalte løsninger Scenario 2

Løsning	Vindu	Yttervegg Iso. tykkelse	Tak Iso. tykkelse	Gulv mot grunn Iso. tykkelse	Solskjerming
1)	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	200mm	400mm	200mm	Markisolette M3911
2)	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	200mm	400mm	200mm	Markisolette M6544
3)	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	200mm	500mm	200mm	Markisolette M3911

Den optimale settpunkt temperaturen vil følge grafen som er vist på [Figur 26](#). Hvor man ser at profilen har et variasjonsområde fra 22,9°C til 16,47°C. Hvis man sammenligner med de andre scenarioene, har denne profilen størst variasjon. Ved dette scenarioet vil man ha den laveste gjennomsnittlige settpunkt temperaturen på 19,27°C, som vil kunne føre til et redusert energibruk til oppvarming. Dette er det knyttet en stor kostnad til og derfor gunstig å redusere.

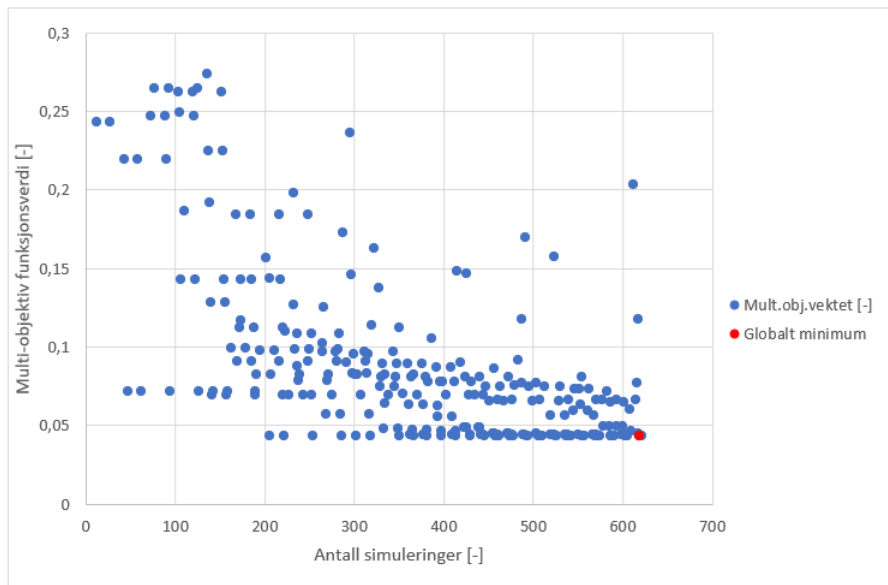


Figur 26 Graf for optimal settpunkt temperatur for Scenario 2

#### 4.2.2.3 Scenario 3

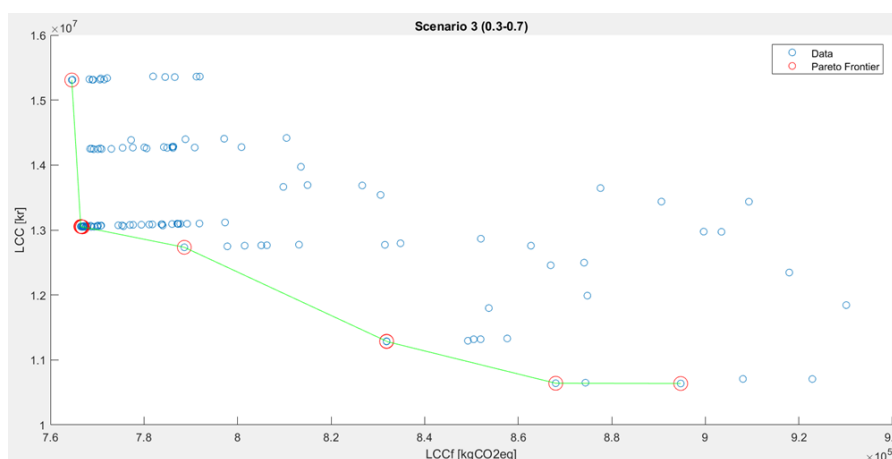
For dette scenarioet er miljø viktigst og derfor vil løsninger med lavest CO<sub>2</sub>-utslipp være prioritert. Etter optimaliseringsprosessen ble det funnet et globalt minimum etter 620 simuleringer. Som i de andre scenarioene er dette punktet hvor den multi-objektive funksjonsverdien er lavest. For dette scenarioet brukte GenOpt flest simuleringer for å finne det globale minimumet. Dette kan det være

flere årsaker til. Mulig at CO<sub>2</sub>-utslippet var lettere å redusere i forhold til kostnad med en liten grad. Punktet er vist i [Figur 27](#) under.



Figur 27 Globalt minimum for Scenario 3

For dette scenarioet er pareto fronten vist med [Figur 28](#) og her ser man at de fleste løsningene befinner seg ved et lavere CO<sub>2</sub>-utslipp. Punktene på linjen vil være de løsningene som vil gi lavest utslipp og kostnad ved en vektlegging av miljø. Som for de andre scenarioene vil den valgte optimale løsningen ligge på denne linjen og være punktet som resulterte i det globale minimumet.



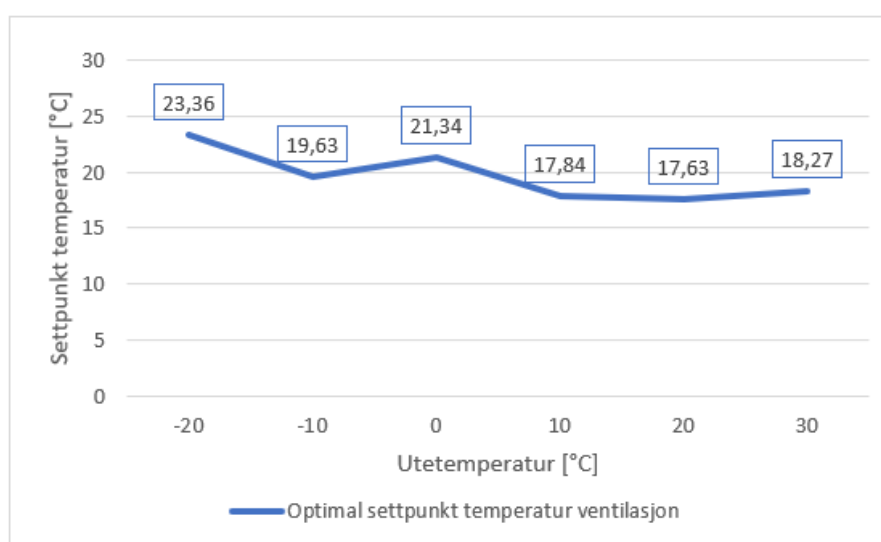
Figur 28 Pareto front Scenario 3

For scenarioet består løsningene også her med bruk av vindustypen med lavest U-verdi. Denne vindustypen har et litt større CO<sub>2</sub>-utslipp enn de andre, men vil samtidig kunne føre til redusert energibruk som det er stort utslipp knyttet til. Forskjellene i dette scenarioet ligger i valg av isolasjonstykkelse for tak. Hvor det er anbefalt å beholde tak, det er mulig dette er på grunn av å slippe CO<sub>2</sub>-utslippet som vil komme fra tiltaket. Løsningene er presentert i [Tabell 16](#).

Tabell 16 Optimale løsninger Scenario 3

Løsning	Vindu	Yttervegg Iso. tykkelse	Tak Iso. tykkelse	Gulv mot grunn Iso. tykkelse	Solskjerming
1)	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	450mm	200mm	200mm	Markisolette M3911
2)	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	450mm	230mm	200mm	Markisolette M3911
3)	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	450mm	300mm	200mm	Markisolette M3911

Resultatet av de optimale settpunkt temperaturene ved gitte utetemperaturer er vist i Figur 29. Hvor settpunkt temperaturen har en tilsvarende profil som de andre scenarioene, men mindre variasjon mellom utetemperaturene 10°C og 20°C. Denne lille endringen kan virke ubetydelig, men ved vurdering over en lang analyseperiode vil små forskjeller kunne føre til store endringer av resultat.



Figur 29 Graf for optimal settpunkt temperatur for Scenario 3

#### 4.2.2.4 Sammenligning av optimale løsninger

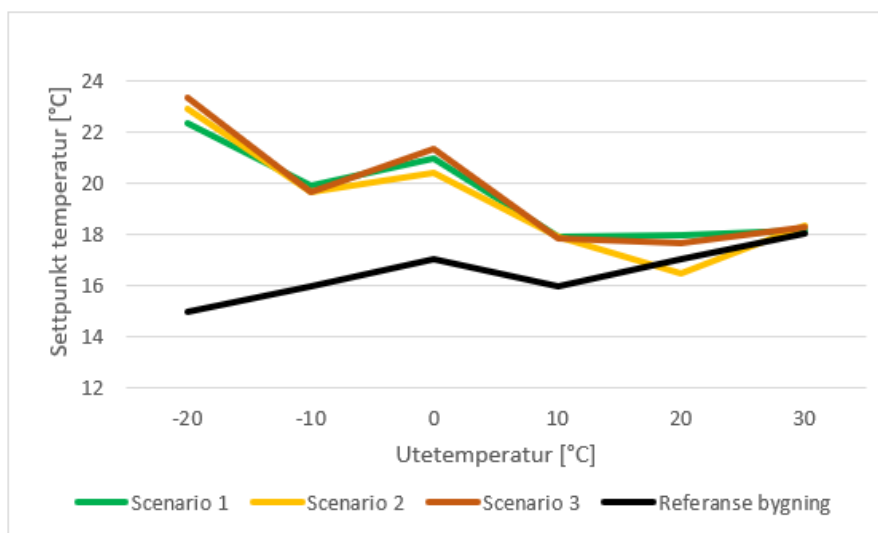
For de ulike scenarioene består de optimale løsningene av ulike kombinasjoner av parametere for klimaskjermen. For alle de optimaliserte scenarioene er det valgt å bytte vindu til det med lavest U-verdi på 0,7 W/m<sup>2</sup>K. Årsaken til dette er redusert energibruk og at det samtidig vil fortsatt kunne opprettholde de definerte begrensningene for termisk komfort. For å redusere kostnaden er det valgt i scenario 2 og beholde tykkelsen for veggisolasjon. Dette er interessant siden man ville tro at ved å øke isolasjonstykkelsen vil man få et redusert energibruk som vil kunne redusere kostnaden. Men på grunn av en stor investeringskostnad ble ikke dette funnet lønnsomt. Alle scenarioene foreslår ulik løsning for takisolasjonstykkelse. Hvor ingen av scenarioene ønsker å benytte eksisterende eller takisolasjonstykkelse med lavest U-verdi. For gulv er det anbefalt å beholde samme isolasjonstykkelse. Det er både knyttet stor kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp for rivning av gulv. I tillegg vil ikke bytte påvirke varmetapet i like stor grad som for eksempel yttervegg, på grunn av mindre areal

mot kaldere temperatur. [Tabell 17](#) under er en oppsummering av de optimale løsningene for hvert scenario.

*Tabell 17 Sammenligning av optimale løsninger*

Løsning	Vindu	Yttervegg Iso. tykkelse	Tak Iso. tykkelse	Gulv mot grunn Iso. tykkelse	Solskjerming
Scenario 1	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4- 15Ar-S(3)4)	450mm	230mm	200mm	Markisolette M6544
Scenario 2	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4- 15Ar-S(3)4)	200mm	400mm	200mm	Markisolette M3911
Scenario 3	Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4- 15Ar-S(3)4)	450mm	200mm	200mm	Markisolette M3911

De ulike scenarioene har en veldig tilsvarende graf for settpunkt til ventilasjons temperaturen og [Figur 30](#) viser en sammenligning av dem. Den største forskjellen ligger som allerede diskutert ved en utetemperatur på 20°C. Årsak til dette kan være at det er ved denne temperaturen det er mulig å finne mest besparelse til ved å redusere settpunkt temperaturen. Sammenlignet med referansebygget vil alle scenarioene nesten alltid bruke en høyere settpunkt temperatur. Dette kan være for å sikre bedre termisk komfort og sørge for at PPD snitt alltid er innenfor den satte begrensningen.

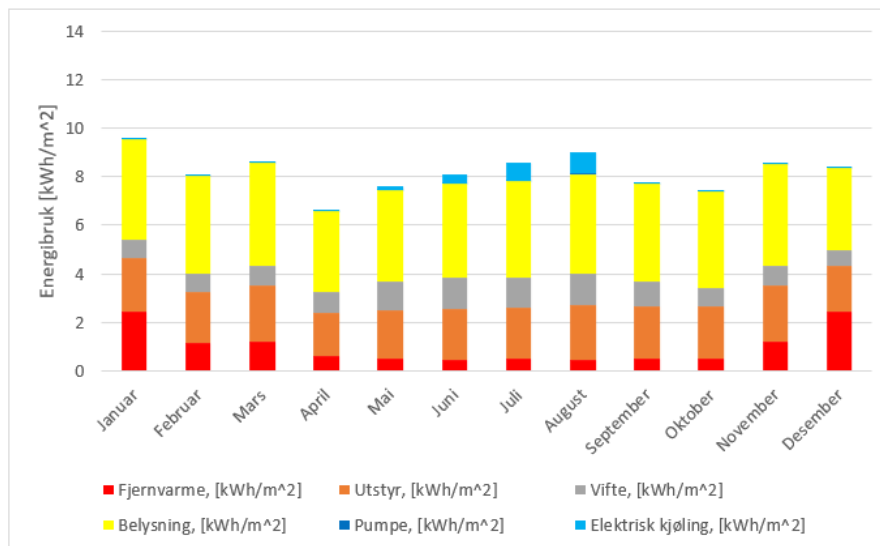


*Figur 30 Sammenligning av settpunkt temperaturer for ventilasjon*

## 4.2.3 Energibruk og temperatur

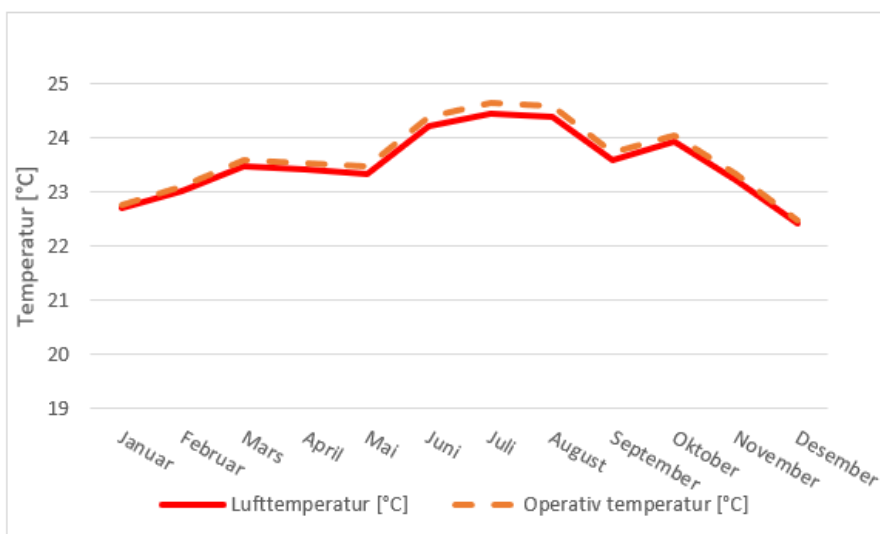
### 4.2.3.1 Scenario 1

Den presenterte optimale løsningen for scenario 1 er energisimulert og resultatene av simuleringen er vist med [Figur 31](#). Dette er den månedlige energibruken for de ulike energipostene, hvor man ser at optimaliseringen har redusert energibruken til fjernvarme. Belysningen og utstyr er tilsvarende grunnet at simuleringen er gjort med samme internlast og bruksmønster av brukere.



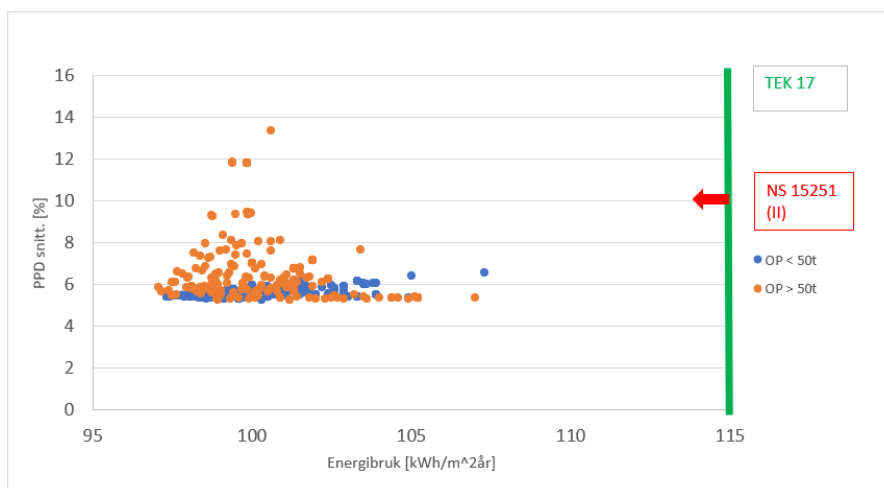
Figur 31 Månedlig energibruk for Scenario 1

For å vurdere den gjennomsnittlige luft- og operativtemperatur for scenarioet er det valgt å analysere samme kritiske rom som for referansebygget. Fra [Figur 32](#) ser man at luft- og operative temperaturen for sonen vil være ganske lik, men noe lavere ved kaldere måneder. Sammenlignet mot referansebygget vil temperaturene være en del høyere, men også ulik endring i september. Det vil være kaldere utetemperatur ved denne måneden og hvis man knytter grafen til settpunkt for ventilasjonen er den høyere ved lave utetemperatur. Dette kan føre til at temperaturene i rommet øker.



Figur 32 Månedlige temperaturer kritisk rom for Scenario 1

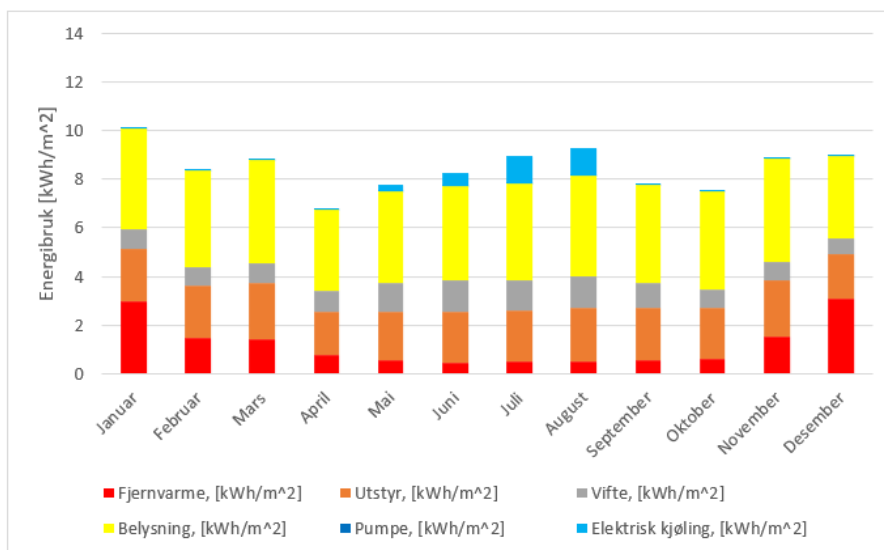
En viktig forutsetning ved optimaliseringen var at termisk komfort skulle bli tatt hensyn til. Alle løsninger som vil kunne resultere i at den operative temperaturen var over 26°C i over 50 timer har blitt ugyldiggjort. **Figur 33** viser de ulike løsningene sine energibruk og PPD gjennomsnittsverdi. Hvor de akseptable løsningene er markert blå og i henhold til klasse II i NS 15251 er under en verdi på 10% selv om kravet i skriptet er satt til 15%. Hvor man også ser at løsningene er under kravet til energibruk for kontorbygg gitt i TEK 17.



*Figur 33 Termisk komfort og energibruk for Scenario 1*

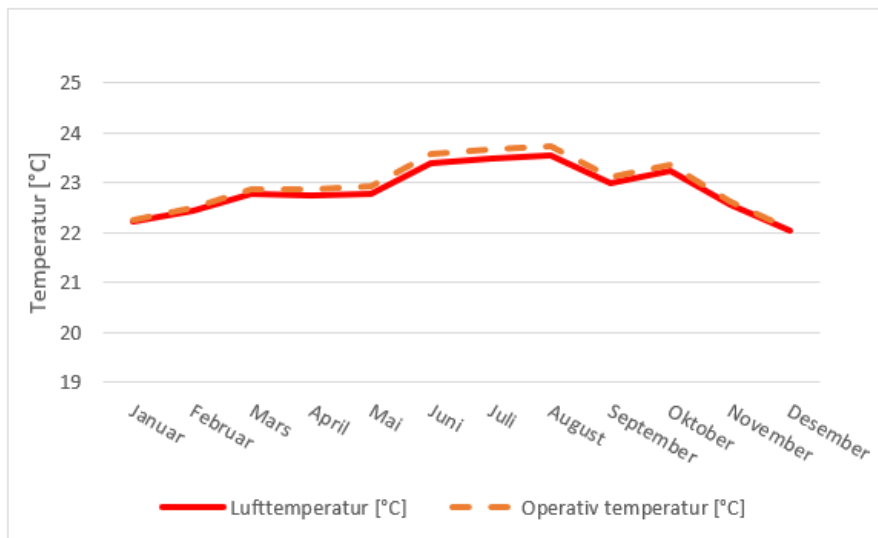
#### 4.2.3.2 Scenario 2

Den optimale løsningen for scenario 2 er også energisimulert og den månedlige energibruken er presentert med **Figur 34**. Her ser man en tilsvarende fordeling, men hvor det er litt større behov for energi til kjøling og energibruk januar måned.



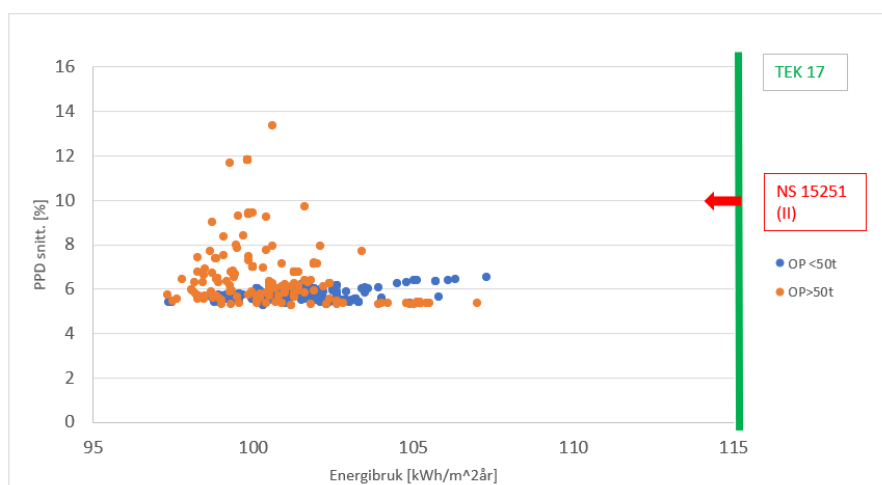
*Figur 34 Månedlig energibruk for Scenario 2*

For det kritiske rommet i dette scenarior vil gjennomsnittets lufttemperaturen og operative temperaturen følge grafen på [Figur 35](#). Temperaturene er del lavere enn for de ulike scenarioene, hvor lufttemperaturen er godt under 24°C. Sammenlignet mot referansebygget vil temperaturene ha en lik endring, men i mars og april være mer stabil. En årsak til at temperaturene er lave i dette scenarior kan være valg av den tynneste isolasjonstykkelsen for yttervegg eller større bruk av kjøling.



Figur 35 Månedlige temperaturer for Scenario 2

Fra [Figur 36](#) ser man sammenhengen mellom den termiske komforten og energibruket for scenarior. Hvor det er flere løsninger som har tilfredsstillende termisk komfort, men som også har et større energibruk. Her ser man også at de akseptable løsningene kan tilfredsstille klasse II i NS 15251.

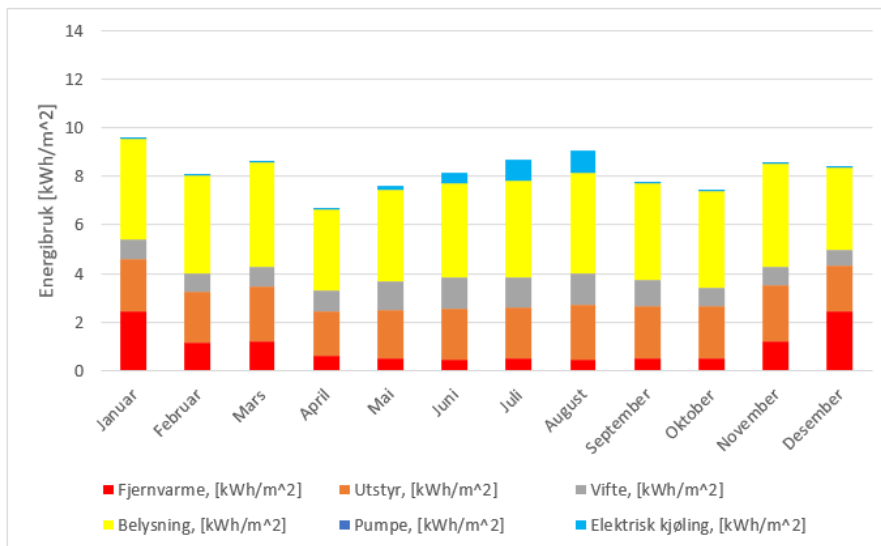


Figur 36 Termisk komfort og energibruk for Scenario 2



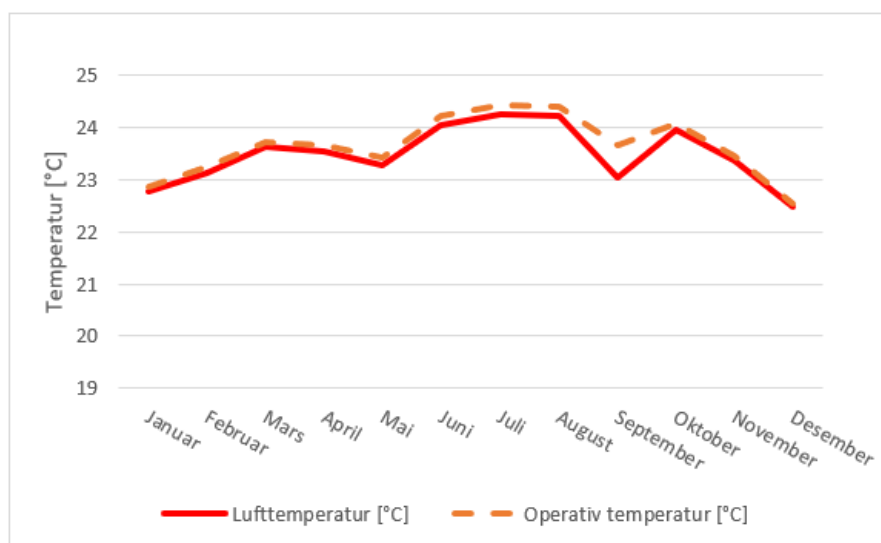
### 4.2.3.3 Scenario 3

For dette scenarioet ble det simulert det laveste behovet for oppvarming, med et lite bruk av fjernvarme vist på [Figur 37](#). Dette kan det være ulike årsaker til, men blant annet at grunnet valg av laveste U-verdi for tak.



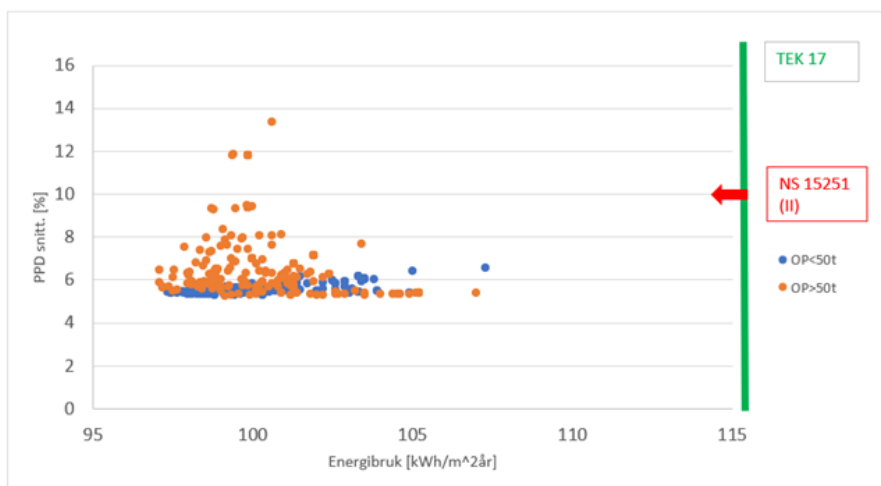
Figur 37 Månedlig energibruk for Scenario 3

I det kritiske rommet ble gjennomsnittslufttemperatur og operativ temperatur simulert og grafen på [Figur 38](#) viser hvordan temperaturene utvikler seg igjennom året. Det er også funnet et fall i september måned for dette scenarioet. Temperaturene for dette scenarioet skiller seg ut ved å ha større endring fra måned til måned, sammenlignet med referansebygget er de også høyere. Det er mulig at siden settpunkt for ventilasjonen endrer seg i størst grad for dette scenarioet mellom 0°C til 10°C grader er årsaken, vist i [Figur 30](#).



Figur 38 Månedlige temperaturer for Scenario 3

For dette scenarioriet har det blitt funnet mange løsninger som har et lavt PPD-gjennomsnitt, vist med [Figur 39](#). Omtrent alle løsninger som tilfredsstiller begrensningen til den operative temperaturen har et PPD-gjennomsnitt som er lavere enn 7%. Resultatene viser også et lavt energibruk knyttet til løsningene.



Figur 39 Termisk komfort og energibruk for Scenario 3

#### 4.2.3.4 Sammenligning av energibruk og temperatur

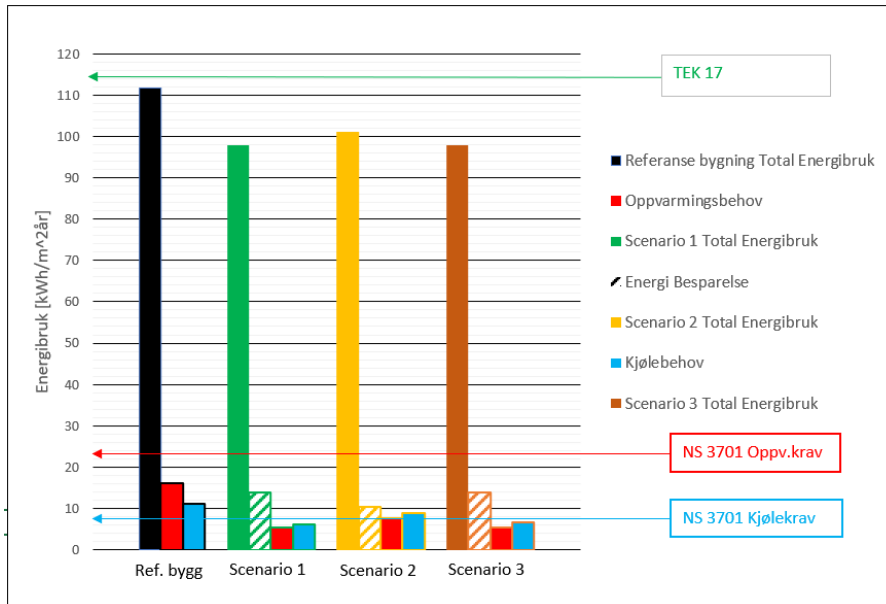
Fra optimaliseringen ble det funnet ulik reduksjon av energibruket for scenarioriet sammenlignet med referansebygget. Ved å benytte løsningen som er foreslått i scenario 1 kan man redusere kjølebehovet med 44,9% og oppvarmingsbehovet med 65,6%. Dette vil resultere i et samlet energibruk på 97,8 kWh/m<sup>2</sup>år. Scenario 2 ga en litt lavere besparelse av total energibruk på 101kWh/m<sup>2</sup>år. Forskjellen fra scenario 1 ligger på 3,4 kWh/m<sup>2</sup>år som kan være av betydning hvis man vurderer over en lengre periode. Scenario 3 har en tilsvarende reduksjon av energibruk som scenario 1, men vil ha litt lavere oppvarmingsbehov. De beregnede behovene for kjøling, oppvarming og total energibruk er presentert i [Tabell 18](#).

Tabell 18 Energibruk av optimale løsninger

Parameter	Spesifikt Kjølebehov [kWh/m <sup>2</sup> år]	Spesifikt Oppvarmingsbehov [kWh/m <sup>2</sup> år]	Totalt Energibruk [kWh/m <sup>2</sup> år]
Referanse bygning	11,18	16,08	111,7
Scenario 1	6,16	5,53	97,8
Scenario 2	8,87	7,66	101,2
Scenario 3	6,71	5,51	97,9

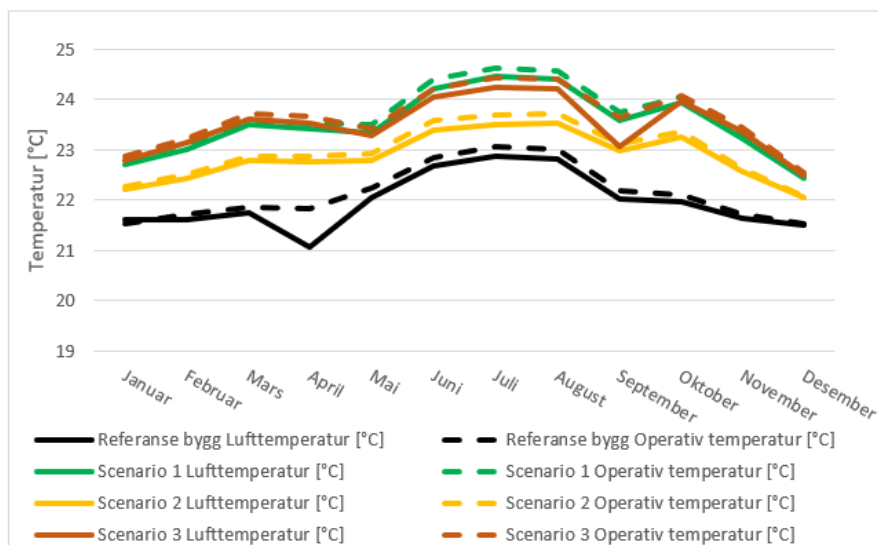
Referansebygget vil allerede tilfredsstille de beregnede behovene for oppvarming og kjøling til et lavenergibygg lokalisert i Oslo. Derimot er det vurdert om det kan tilfredsstille passivhuskravet etter renovering. Siden bygget vil i utgangspunktet ikke kunne tilfredsstille kravet for kjøling på 7,56 kWh/m<sup>2</sup>år. Fra [Figur 40](#) ser man en sammenligning av energibruket til de ulike scenarioriet og de beregnede kravene til kjøling og oppvarming. Med et lavt behov for oppvarming i utgangspunktet vil

kravet på 20,72 kWh/m<sup>2</sup>år være tilfredsstilt. Det eneste scenarioet som kan ha problem med å tilfredsstille alle kravene er scenario 2 hvor energibruken til kjøling er 1,31 kWh/m<sup>2</sup>år for høyt. Kravet til kjøling er som forklart sterkt avhengig av den valgte dimensjonerende utetemperaturen for sommermånedene. Ved å øke den med 1°C vil scenarioet være innenfor kravet. Hvis det er ønske ved prosjektering å tilfredsstille passivhus kravene vil det derimot være best å benytte seg av løsninger fra enten scenario 1 eller 3.



Figur 40 Sammenligning av energibruk

De simulerte temperaturene i det kritiske rommet har små forskjeller mellom de ulike scenarioene, men sammenlignet med referansebygget før tiltak er de litt høyere. Konsekvenser av dette vil være et redusert kjølebehov, hvis det er tilsvarende forhold i andre rom. Denne reduksjonen er i samsvar med resultatene fra forrige Figur 40. Temperaturene for kritisk rom i de ulike scenarioene og før tiltak er vist med Figur 41 under.

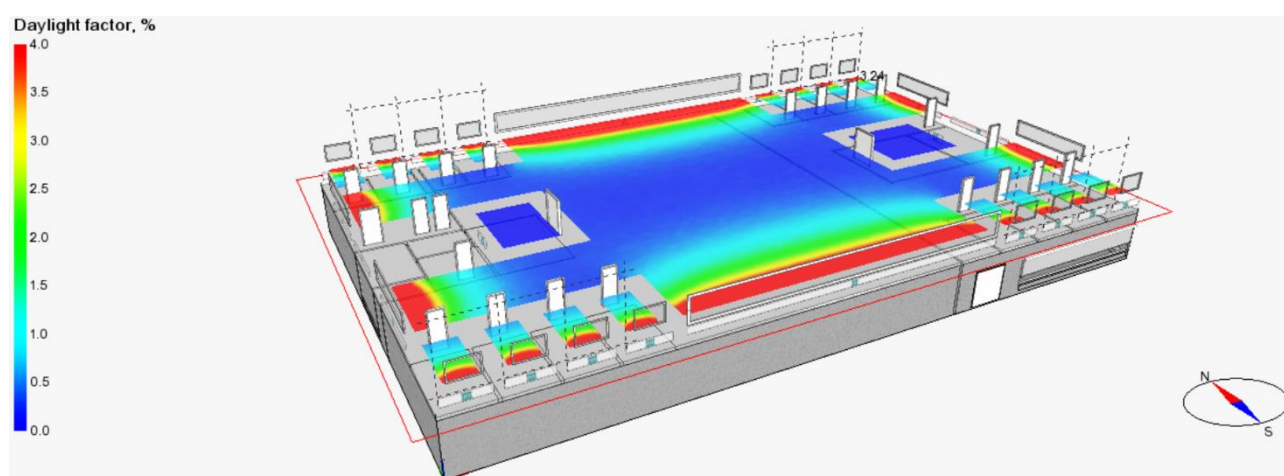


Figur 41 Sammenligning av temperaturer

## 4.3 Dagslys

### 4.3.1 Referanse bygning

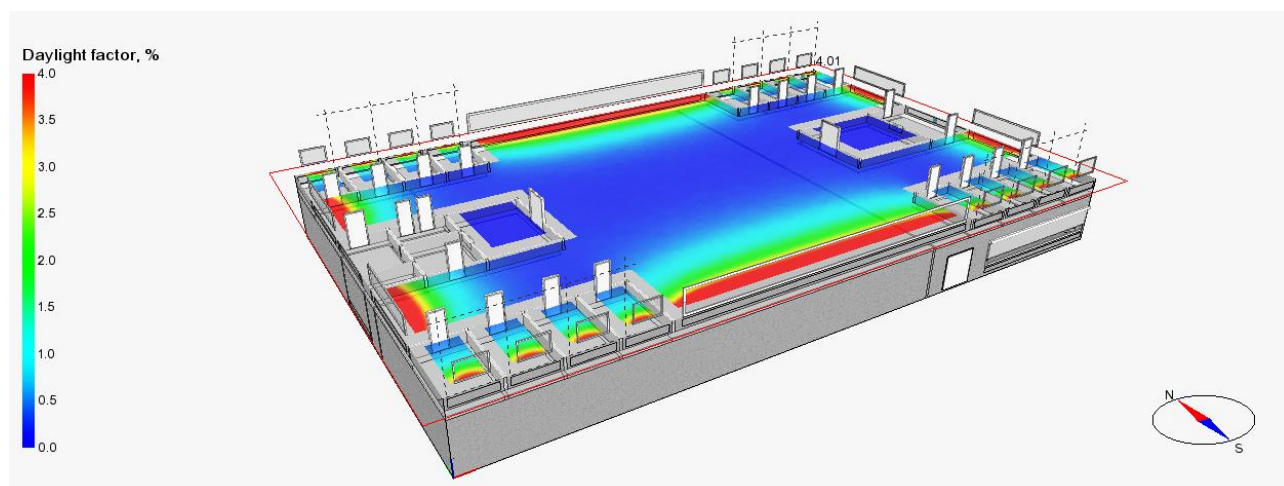
Det ble valgt å gjennomføre en dagslys simulering for å kontrollere at referansebygget tilfredstiller det kvalitative kravet i TEK 17, som sier at rom for varig opphold skal ha tilfredstillende tilgang til dagslys. Det er foreslått en preakseptert ytelse med å ha en gjennomsnittlig dagslysfaktor på 2% i rommet. Dette er en krevende ytelse å oppnå. Spesielt for soner med lavt «vegg mot gulv» forhold og soner uten yttervegger. Hvilke rom som er ment for varig opphold kan også diskuteres, men resultatene for referansebygget viste at kontorene hadde tilstrekkelig med dagslys. Dette er vist med [Figur 42](#) som er resultatet av dagslysforholdene i 2. etasje for referansebygget.



Figur 42 Dagslysforhold 2. etasje Referanse bygning før tiltak

### 4.3.2 Scenario 1

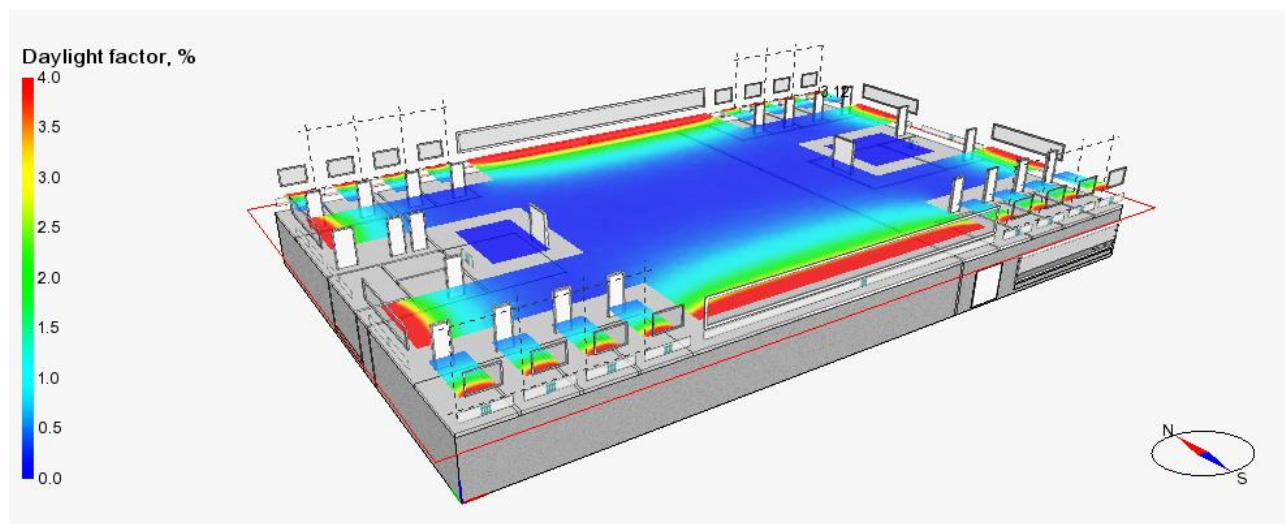
Dagslyssimulering ble også gjort ved dette scenarioet, hvor det har blitt gjennomført renovering. Resultatet etter tiltak for scenario 1 er vist med [Figur 43](#) under. Hvor man kan se at dagslys faktoren har blitt dårligere.



Figur 43 Dagslysforhold 2 etasje Referanse bygning etter tiltak Scenario 1

### 4.3.3 Scenario 2

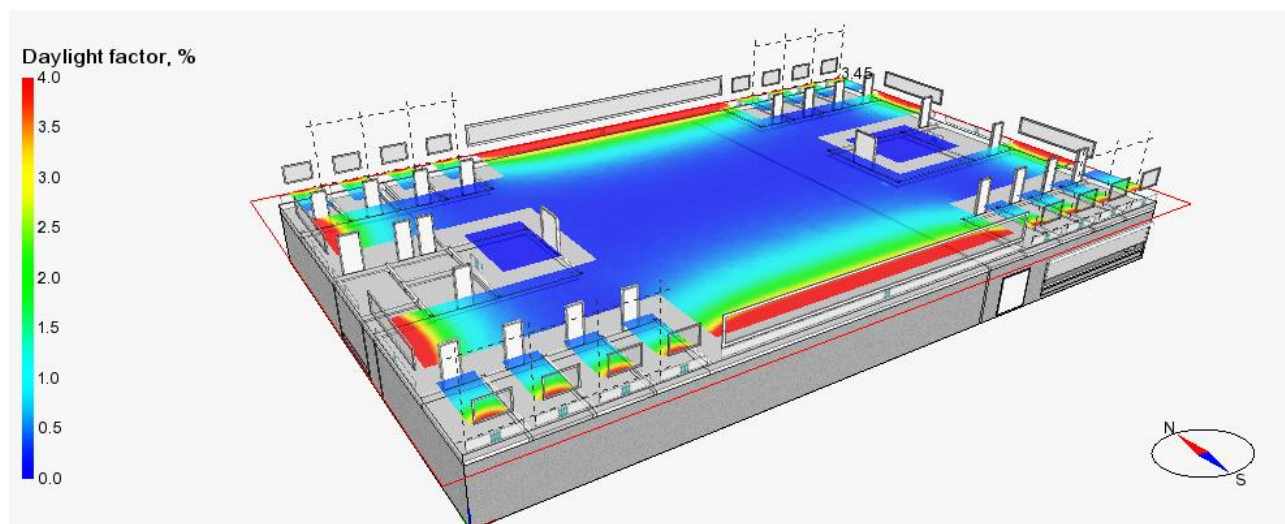
I dette scenarioet viste resultatene en litt bedre dagslysfaktor i sonene enn for scenario 1. Det kan tyde på å benytte solskjermingen av type M3911 vil være en fordel for å kunne få tilfredsstillende tilgang på dagslys. Samtidig var den gjennomsnittlige dagslysfaktoren for sonene under 2%, som vil bety at også i dette scenarioet vil det kunne være utilstrekkelig med dagslys. Figur 44 viser resultat av simuleringen.



Figur 44 Dagslysforhold 2 etasje Referanse bygning etter tiltak Scenario 2

### 4.3.4 Scenario 3

Dette scenarioet har samme kombinasjon av parametere som scenario 2 til vindustype og solskjerming. Resultatene viser fortsatt litt dårligere forhold enn for scenario 2, men også stor forskjell fra før tiltaket. Figur 45 viser dagslysforholdene for scenarioet.



Figur 45 Dagslysforhold 2 etasje Referanse bygning etter tiltak Scenario 3

### 4.3.5 Sammenligning av dagslys

Alle resultatene fra dagslyssimuleringene er vist i [Vedlegg F](#), hvor tabellverdier viser tydeligere forskjell mellom scenarioene. Det ble før tiltak vurdert at dagslysforholdene i bygget ville kunne være akseptable. Dette er grunnet blant annet bruk av vindu og solskjerming som har høyere lystransmisjon, men etter renovering viste alle scenarioene et ikke tilfredsstillende nivå av dagslysforhold. Hvis dagslys er en parameter av viktighet ved prosjektering er det derfor funnet hensiktsmessig å legge dagslys resultatet som en begrensning i det grafiske skriptet.

## 4.4 LCC vurdering

Kostnaden er en av objektivene ved optimaliseringen og man ønsker å finne løsningen som vil kunne gi størst besparelse, men hvor det også tas hensyn til CO<sub>2</sub>-utslipp og termisk komfort. Fra resultatene av energibruket ble det vist at scenario 1 og 3 ga størst reduksjon av energi. Det er derimot ikke slik at kostnaden bare vil avhenge av energibruket, men også investering, vedlikehold og rivning. Derfor må en nærmere vurdering av kostnad gjennomføres.

For referansebygget ble det beregnet en total kostnad grunnet operasjon og vedlikehold på 8433 kr/m<sup>2</sup>. Dette er beregnet over en analyseperiode på 60 år og er vist i [Vedlegg B. Tabell 19](#) under viser de ulike kostnadene for den optimale løsningen i scenarioet og deres prosentvise besparelse. Fra LCC resultatene kan man se at scenarioet som vektet kostnad ga den største besparelsen på 57,1%. Dette scenarioet ville hatt en mindre besparelse hvis energiprisen ble forutsatt til å ha en større endring enn 1%, siden scenarioet har størst energibruk. Sammenligner man besparelsen med de andre scenarioene vil forskjellene være ca. 10% eller 818 kr/m<sup>2</sup>. De andre scenarioene hadde en tilsvarende besparelse, men hvor scenario 1 så vidt er mer lønnsomt.

Resultatene viser at investeringen i å forbedre klimaskjermen og settpunktet til ventilasjonen vil ha stor lønnsomhet. Ved å gjennomføre en renovering vil man kunne redusere kostnaden uavhengig vektlegging med omtrent 50%. Dermed ser man at investeringskostnad for samtlige av de ulike designløsningene er gunstig å ta. Under optimaliseringen var det nødvendig å finne de minimale og maksimale verdiene for kostnad. Disse verdiene vil tilsvare å bare optimalisere for kostnad. Ved å prosjektere feil eller minst gunstig vil den maksimale kostnaden kunne være på 10 924 kr/m<sup>2</sup>. Sammenlignet med å gjennomføre det mest lønnsomme tiltaket i scenario 2 vil man kunne spare 7304 kr/m<sup>2</sup>, hvor også CO<sub>2</sub>-utslipp er tatt hensyn til. Hvis det ikke skulle tas hensyn til CO<sub>2</sub>-utslipp ville kostnaden kunne vært så lav som 3597 kr/m<sup>2</sup>, for den optimale løsningen. Dette viser hvor betydningsfull en optimaliseringsprosess vil være og påvirkningen av å gjennomføre en multi-objektiv optimalisering.

Tabell 19 Sammenligning av LCC resultater

Parameter	Kostnad [kr/m <sup>2</sup> ]	Besparelse [%]
Referanse bygning	8433	(-)
Scenario 1	4438	47,4
Scenario 2	3620	57,1
Scenario 3	4440	47,3

#### 4.5 LCCf vurdering

Den andre objektivet for optimalisering er CO<sub>2</sub>-utslippet til løsningene og resultatene viser store muligheter for reduksjon. På samme måte som kostnad, vil ikke utslippet bare være avhengig av energibruk og valg av type energiforsyning, men også til valg av materiale og eventuell rivning eller demontering. For å beregne utslippet for referansebygget ble utslipp grunnet materialet, demontering av vindu og operasjon lagt sammen. Dette er vist i [Vedlegg B](#). Det totale utslippet for referansebygget er beregnet til å være 470 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. [Tabell 20](#) under viser en sammenligning av LCCf resultatene til scenarioene. For scenario 2 ga den optimale løsningen et CO<sub>2</sub>-utslipp på 260 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> som vil resultere i en reduksjon på 178 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Dette er en mindre reduksjon enn for scenario 1 og 3. Ved disse scenarioene vil man kunne øke reduksjonen ytterligere 31,2 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Hvis man vil ha størst reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp vil det derfor være optimalt å bruke løsningen fra scenario 3. Men det er også vist at ved å endre vekten fra 0,5 til 0,7 for miljø vil ikke forskjellen bli større enn 0,1 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

Ved å renovere referansebygget er det vist at man kan få store reduksjoner av CO<sub>2</sub>-utslipp. Det ble også for CO<sub>2</sub>-utslippet først optimalisert bare for CO<sub>2</sub> for å finne min og maks verdier. Disse løsningene ga et resultat på 258,7 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> og 416 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Dette viser en forskjell på 155,3 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> mellom å velge den optimale for scenario 3 og den potensielle minst miljøvennlige løsningen. Til disse løsningene med minimal og maksimal CO<sub>2</sub>-utslipp vil det også være knyttet større kostnad til, på 4435kr/m<sup>2</sup> og 83 821kr/m<sup>2</sup>. Ved å gjennomføre en optimaliseringsprosess er det slik vist at det er mulig å sørge for store reduksjoner av CO<sub>2</sub>-utslipp.

Tabell 20 Sammenligning av LCCf resultater

Parameter	CO <sub>2</sub> -utslipp [kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ]	Reduksjon [kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ]
Referanse bygning	470	(-)
Scenario 1	260,8	209,2
Scenario 2	292	178
Scenario 3	260,7	209,3

## 4.6 Multi-objektiv vurdering

Resultatene har vist at mulighetene for å redusere både kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp er store. Tabell 21 viser en sammenligning mellom resultatene for objektivene til scenarioene. Skulle man velge mellom den optimale løsningen fra scenario 1 og 3 vil man ved å øke kostnaden med 2 kr/m<sup>2</sup> redusere utslipp med 0,1 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Om denne kostnaden er av stor betydning ved prosjektering vil en kunne ta stilling til, men ikke funnet stor. Derimot om man bare vil fokusere på det mest lønnsomme vil valg av løsning fra scenario 2 ha en mindre kostnad på 819 kr/m<sup>2</sup>. Dette vil samtidig føre til et større utslipp med 31,3 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> sammenlignet med de andre scenarioene. Energibruket var ikke en av objektivene for optimalisering, men resultatene viste at også dette kunne reduseres betydelig.

Tabell 21 Total multi-objektiv vurdering

Parameter	Kostnad [kr/m <sup>2</sup> ]	CO <sub>2</sub> -utslipp [kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ]	Energibruk [kWh/m <sup>2</sup> år]
Referanse bygning	8433	470	111,7
Scenario 1	4438	260,8	97,8
Scenario 2	3620	292	101,2
Scenario 3	4440	260,7	97,9



## 5 Konklusjon

Dette studiet har vist at ved å gjennomføre en renovering av klimaskjermen og forbedre settpunkt til ventilasjonsenheten kan man redusere kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp med hensyn til termiske komfort anbefalinger. Den gjennomførte multi-objektive optimaliseringen av referansebygget ville kunne gjøre at bygget ikke bare tilfredsstillende TEK 17, men også Passivhusstandarden 3701. Avhengig av vektleggingen mellom kostnad og miljø vil man også kunne sørge for ulike besparelser og reduksjoner til objektivene. Hvis det renoveres med vektlegging av kostnad vil man kunne ha en besparelse på 57%, men samtidig ha et større CO<sub>2</sub>-utslipp enn ved et av de andre scenarioene. En vektlegging av miljø førte til en reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp på 209,3 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> sammenlignet ved ingen tiltak. Dette scenarioet vil sørge for at referansebygget vil tilfredsstillende Passivhusstandarden 3701, men gi en mindre kostnadsbesparelse på 47%.

Hvis det er forutsatt en likestilling mellom objektivene vil dette føre til en omtrent lik besparelse og reduksjon som ved å vektlegge miljø. Hvor forskjellen bare vil være 2kr/m<sup>2</sup> og 0,1 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Resultatene viste også at uavhengig av scenario vil en renovering føre til en betydelig reduksjon av energibruk. Ved ulik vektlegging ville også de optimale løsningene bestå av forskjellige kombinasjoner av bygningsparametere og settpunkt temperaturer for ventilasjonsenheten. Felles for scenarioene var å beholde isolasjonstykkelse for gulv og bytte til vindu med lav U-verdi. Studiet gjennomførte derfor videre en vurdering av dagslysforholdene før og etter tiltak. Det ble vurdert at etter tiltak ville bygget kunne ha utilfredsstillende tilgang til dagslys. Derfor foreslås det å legge til dagslys som begrensning ved optimalisering. Studiet konkluderer med at ved å gjennomføre en multi-objektiv optimalisering med den foreslåtte metoden vil bygg kunne prosjekteres mer lønnsomt og kunne imøtekomme fremtidige klimamål.

Fremtidig arbeid kan ta for seg det nye tillegget for multi-objektiv optimalisering i IDA-ICE og sammenligne det med tidligere studier for en vurdering av dets nøyaktighet. Det er også interessant å vurdere miljøpåvirkningen ved å optimalisere andre parametere som kontroll av solskjerming eller energiforsyning. Dette kan for eksempel være å implementere solceller for bygget, som vil kunne gjøre bygget til plusshus.

## 6 Referanser

- [1] D. H. K. Dr. Ian Hamilton, Oliver Rapf, Dr. Judit Kockat, Dr. Sheikh Zuhaib, Thibaut Abergel, Michael Oppermann, Martina Otto, Sophie Loran, Irene Fagotto, Nora Steurer, Natacha Nass "2020 global status report for buildings and construction," United Nations Environment Programme 2020, [https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR\\_FULL%20REPORT.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf).
- [2] E. Norge. 2021. *Energibruk og klimagassutslipp*. Hentet fra: <https://energifaktanorge.no/norsk-energibruk/energibruk-og-klimagassutslipp/>.
- [3] NVE. 2021. *Energieffektivisering i norske bygninger kan redusere energibruken tilsvarende 10 prosent av Norges strømforbruk*. Hentet fra: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/energieffektivisering-i-norske-bygninger-kan-reducere-energibruken-tilsvarende-10-prosent-av-norges-stromforbruk/>.
- [4] M. Hamdy og G. M. Mauro, "Multi-objective optimization of building energy design to reconcile collective and private perspectives: Co2-eq vs. Discounted payback time," *Energies*, vol. 10, nr. 7, s. 10-16, 2017.
- [5] R. K. Tuomo Niemelä, Juha Jokisalo, "Cost-optimal energy performance renovation measures of educational buildings in cold climate," *Applied Energy*, vol. 183, s. 1005-1020, 2016.
- [6] V. C. Federica Rosso, Jacopo Dell'Olmo, Ferdinando Salata, "Multi-objective optimization of building retrofit in the mediterranean climate by means of genetic algorithm application," *Energy and Buildings*, vol. 216, s. 109945, 2020.
- [7] N. B. Fabrizio Ascione, Gerardo Maria Mauro, Davide Ferdinando Napolitano, "Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones," *Energy*, vol. 174, s. 359-374, 2019.
- [8] M. K. Youssef Bichiou, "Optimization of envelope and hvac systems selection for residential buildings," *Energy and Buildings*, vol. 43, nr. 12, s. 3373-3382, 2011.
- [9] B. O. Sadik Yigit, "A simulation-based optimization method for designing energy efficient buildings," *Energy and Buildings*, vol. 178, s. 216-227, 2018.
- [10] F. F. Fatima Harkoussa, Pascal Henry Biwole, "Multi-objective optimization methodology for net zero energy buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 16, s. 57-71, 2018.
- [11] S. L. Ran Wang, Wei Feng, "A three stage optimization methodology for envelope design of passive house considering energy demand, thermal comfort and cost," *Energy*, vol. 192, s. 116723, 2020.
- [12] R. R. a. D. M. Yair Schwartz, "Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study," *Energy* vol. 97, s. 58-68, 2016.
- [13] C. L. Yu Wang, Xin Jin, Yongguang Xiang, Xiaogang Li, "Multi-objective optimization of rolling schedule for tandem cold strip rolling based on nsga-ii," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 60, s. 257-267, 2020.
- [14] J. F.-G. Krzysztof Grygierek, "Multi-objective optimization of the envelope of building with natural ventilation," *Energies*, vol. 11, nr. 6, 2018.
- [15] A. A. Zahra S. Moussavi Nadoushani, "Effects of structural system on the life cycle carbon footprint of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 102, s. 337-346, 2015.
- [16] M. C. Marco Beccali, Mario Fontana, Sonia Longo, Marina Mistretta, "Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 27, s. 283-293, 2013.

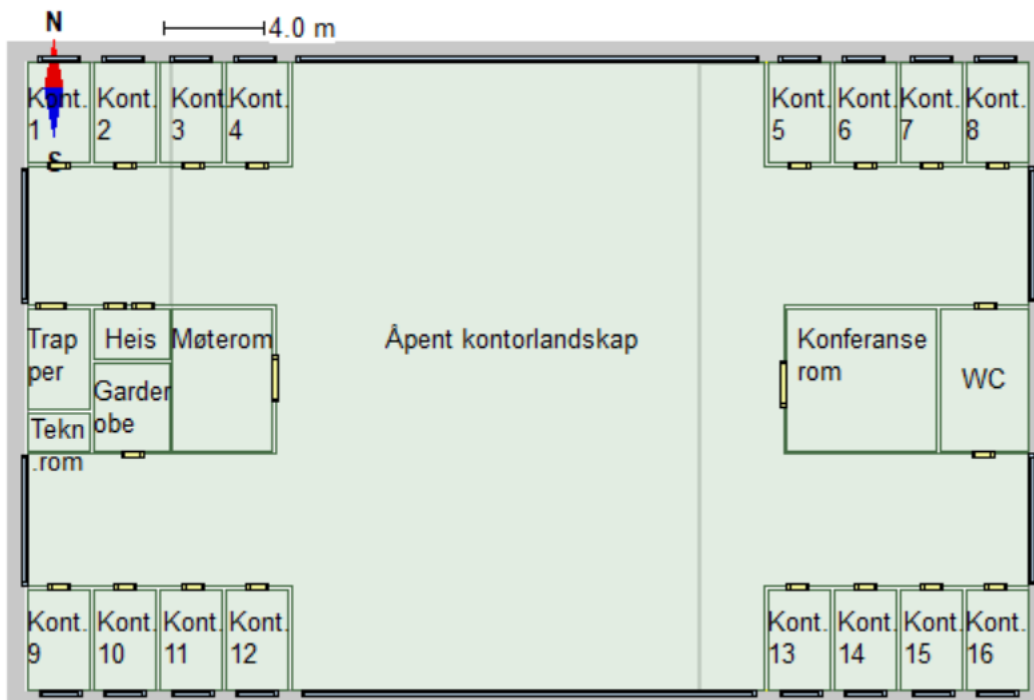
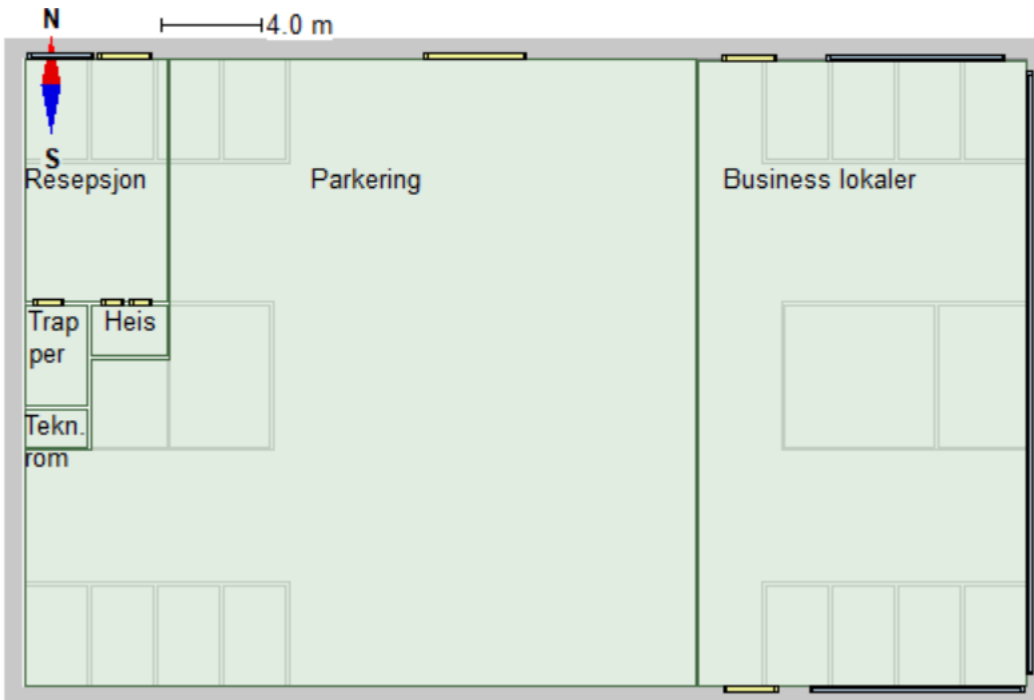
- [17] A. T. Sudip Kumar Pal, Kari Alanne, Kai Siren, "A life cycle approach to optimizing carbon footprint and costs of a residential building," *Building and Environment*, vol. 123, s. 146-162, 2017.
- [18] M. S. Jani Mukkavaara, Karin Sandberg, Anna Pousette, Joakim Norén, "Sustainability evaluation of timber dwellings in the north of Sweden based on environmental impact and optimization of energy and cost," *Procedia Manufacturing*, vol. 44, s. 76-83, 2020.
- [19] K. L. Tuomo Niemelä, Risto Kosonen, Juha Jokisalo, "Cost-optimal renovation solutions to maximize environmental performance, indoor thermal conditions and productivity of office buildings in cold climate," *Sustainable Cities and Society*, vol. 32, s. 417-434, 2017.
- [20] J. H. Janne Hirvonen, Juha Jokisalo, Antti Kurvinen, Arto Saari, Tuomo Niemelä, Paula Sankelo, Risto Kosonen, "Emissions and power demand in optimal energy retrofit scenarios of the Finnish building stock by 2050," *Sustainable Cities and Society*, vol. 70, s. 102896, 2020.
- [21] M. Wetter, "Generic optimization program user manual version 3.0.0," 2009, <https://doi.org/10.2172/962948>.
- [22] M. H. Matti Palonen, Ala Hasan, "Mobo a new software for multi-objective building performance optimization " i *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, France, 2013.
- [23] N. R. E. Laboratory. 2010. *Opt-e-plus software for commercial building optimization*. Hentet fra: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/45620.pdf>.
- [24] Y. Zhang, "Use jeplus as an efficient building design optimisation tool " i *CIBSE ASHRAE Technical Symposium*, London Uk, 2012, s. 12: Imperial College.
- [25] A. R. Christensen. C, Horowitz. S, Courtney. A, Spencer. J, "Beopt(tm) software for building energy optimization: Features and capabilities," 2006, <https://doi.org/10.2172/891598>.
- [26] H. L. Fanny Pernodet Chantrelle, Werner Keilholz, Mohamed El Mankibi, Pierre Michel "Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings," *Appl Energy*, vol. 88, nr. 4, s. 1386-1394, 2011.
- [27] W. Q. C. Z.C.Tian, P.Tang, J.G. Wang, X.Shi, "Building energy optimization tools and their applicability in architectural conceptual design stage," *Energy Procedia*, vol. 78, s. 2572-2577, 2015.
- [28] H. B. M. Mehrdad Rabani, Natasa Nord, "Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 44, s. 101020, April 2021.
- [29] M. Omid, "Optimalisering av klimaskjerm og ventilasjonsparametere i et eksisterende kontorbygg," Master, Teknologi, kunst og design, Oslo Metropolitan University, 2019.
- [30] D. f. byggkvalitet. 2017. *Byggteknisk forskrift (tek17) med veiledning*. Hentet fra: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/>.
- [31] Lovdata. 2017. *Forskrift om tekniske krav til byggverk (byggteknisk forskrift)*. Hentet fra: [https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840/KAPITTEL\\_1#KAPITTEL\\_1](https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840/KAPITTEL_1#KAPITTEL_1).
- [32] A. S. H. B. Steinar Anda, *Fra passivhus til plusshus*. Fagbokforlaget Vigmostad & Bjørke AS, 2013, s. 149.
- [33] S. Norge, *Ns 3701 passivhus - kriterier for passivhus og lavenergibygninger - yrkesbygninger*, 2012.
- [34] SINTEF. 2018. *Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring*. Hentet fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/204/klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring?gclid=CjwKCAjwqvyFBhB7EiwAER786YRnArAGTsatJov4dXdXtPiUmpWjnaCpGj11e8lSiO7TAxB618O5WxoCAuUQAvD\\_BwE](https://www.byggforsk.no/dokument/204/klimadata%20for%20termisk%20dimensjonering%20og%20frostsikring?gclid=CjwKCAjwqvyFBhB7EiwAER786YRnArAGTsatJov4dXdXtPiUmpWjnaCpGj11e8lSiO7TAxB618O5WxoCAuUQAvD_BwE).
- [35] S. Norge, *Ns 3031:2014 - beregning av bygningers energiytelse metode og data*, 2014.

- [36] S. Norge, *Ns-en 15251:2007 - inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk*, 2007.
- [37] S. Norge, *Ns 3720:2018 - metode for klimagassberegninger for bygninger*, 2018.
- [38] S. Norge, *Ns 3454:2013 - livssyklus kostnader for byggverk - prinsipper og klassifisering*, 2013.
- [39] Arbeidstilsynet, *Arbeidstilsynets veiledning 444 - klima og luftkvalitet på arbeidsplassen*, 1991.
- [40] N. I. AS og B. AS. 2021. *Norsk prisbok*. Hentet fra: <https://www.norskprisbok.no/WhatIsNP.aspx>.
- [41] SINTEF. 2021. *Hva er byggforskserien?* Hentet fra: [https://www.byggforsk.no/side/198/hva\\_er\\_byggforskserien](https://www.byggforsk.no/side/198/hva_er_byggforskserien).
- [42] E. S. T. Group. 2020. *Ida indoor climate and energy* Hentet fra: <https://www.equa.se/en/ida-ice#>.
- [43] EQUA. 2021. *Climate data download center*. Hentet fra: [http://www.equaonline.com/ice4user/new\\_index.html](http://www.equaonline.com/ice4user/new_index.html). Lastet ned: 10.3.2021.
- [44] D. A. Roth. 2021. *Energyplus*. Hentet fra: <https://energyplus.net/>.
- [45] ProgramByggerne. 2021. *Simien*. Hentet fra: <http://www.programbyggerne.no/>.
- [46] T. E. S. Specialists. 2021. *Trnsys, transient system simulation tool*. Hentet fra: <http://www.trnsys.com/index.html>.
- [47] M. Wetter. 2021. *Genopt, generic optimization program*. Hentet fra: <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/index.html>.
- [48] I. NORDIC. 2013. *Tools mobo*. Hentet fra: <https://ibpsa-nordic.org/tools>.
- [49] EQUA. 2021. *Ida-ice 5*. Hentet fra: [http://www.equaonline.com/iceuser/idaice5\\_resources.html](http://www.equaonline.com/iceuser/idaice5_resources.html).
- [50] D.Solar. 2018. *"Dickson solar protection"*. Hentet fra: <http://documents.dickson-constant.com/en/UK/solar-protection/sunworker>.
- [51] Y. D. Y. Fang, N. Nord, "Data-driven analysis of occupancy and lighting patterns in office building in norway," *REHVA J*, s. 64-69, 2019.
- [52] Enova. 2012. *471. 411 u-verdier. Vegger over terreng med bindingsverk av tre med kontinuerlig utvendig isolasjon*. Hentet fra: <https://www.byggforsk.no/dokument/4046/u-verdier-vegger-over-terreng-med-bindingsverk-av-tre-med-kontinuerlig-utvendig-isolasjon>.
- [53] Glava. 2021. *Betongdekke med kombiløsning*. Hentet fra: <https://www.glava.no/losninger/betongdekke-med-kombilosning>.
- [54] Glava. 2021. *Plate på mark*. Hentet fra: <https://www.glava.no/losninger/plate-pa-mark>.
- [55] P. N. AS, "Glassfakta 2021," utg., 2021.
- [56] S. Sentralbyrå. 2021. *Fjernvarme og fjernkjøling*. Hentet fra: <https://www.ssb.no/fjernvarme>.
- [57] S. Sentralbyrå. 2021. *Elektrisitetspriser*. Hentet fra: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/elkraftpris>.
- [58] K. B. Inger Andresen, Catherine Grini, Karin Sjøstrand, og M. T. o. T. Wigenstad, "Miljøvennlig varmforsyning til lavenergi- og passivhus," 2010, <https://www.sintefbok.no/book/index/655/miljoevennlig-varmforsyning-til-lavenergi-og-passivhus>.
- [59] NVE. 2021. *Strømforbruk i norge har lavt klimagassutslipp*. Hentet fra: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/stromforbruk-i-norge-har-lavt-klimagassutslipp/>.
- [60] R. P. V. Deepthisree Madathil, Manjula G Nair, Tooraj Jamsab, Tripta Thakur, "Consumer-focused solar-grid net zero energy buildings: A multi-objective weighted sum optimization

and application for india," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27, s. 2101-2111, 2021.

# VEDLEGG

## Vedlegg A Plantegninger av referansebygg



## Vedlegg B Kostnader, CO<sub>2</sub> verdier og beregninger

Kostnader og CO <sub>2</sub> -utslipp										
	<u>Materiale (Investering og Vedlikehold)</u>					<u>Rivning/Utskiftning/Opplastning og Transport</u>				
	Total U-verdi [W/m <sup>2</sup> K]	Kostnad/m <sup>2</sup> [kr/m <sup>2</sup> ], Ci	Post Norsk Prisbok	Levetid [år], Y	CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ], Ki		Kostnad/m <sup>2</sup> [kr/m <sup>2</sup> ], Li	Post Norsk Prisbok	CO <sub>2</sub> [kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ], Mi	Areal [m <sup>2</sup> ], Ai
<b>Vinduer</b>		30år 60 år			30år 60 år					251,16
Pilkington Optitherm S1 4-12Ar-S(1)4	1,2	23814,3 33548	02.3.K.013	30	278,99 278,99		3954,9	02.0.D.003	1,37	
Pilkington Suncool 70/40 (6C(74)-15Ar-4))	1,1	34469,86 34469,86		30	296,59 296,59		6421,8	02.0.D.003	2,74	
Pilkington Optitherm S3 4-12Ar-4-12Ar-S(3)4	1	35391,72 35391,72		30	314,19 314,19		6421,8	02.0.D.003	2,74	
Pilkington K Glass 4KN-16Ar-4-16Ar-KN4	0,8	37235,44 37235,44		30	349,39 349,39		6421,8	02.0.D.003	2,74	
Pilkington Suncool 70/35 (6C(70)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	0,7	38157,3 38157,3	02.3.K.014	30	367 367		6421,8	02.0.D.003	2,74	
<b>Yttervegg</b>										976,05
<i>Isolasjonstykkelse</i>										
200 mm	0,22	820,2	02.3.D.003	60	5,64		325,8	02.0.2.0150	0	
250 mm	0,2	1246,93	02.3.D.004	60	7,05		424,03	02.0.2.0150	0,48	
300 mm	0,17	1430,93	02.3.D.006	60	8,46		424,03	02.0.2.0150	0,48	
350 mm	0,15	1581,73	02.3.D.007	60	9,86		424,03	02.0.2.0150	0,48	
400 mm	0,13	2956,93	02.3.D.010	60	11,28		424,03	02.0.2.0150	0,48	
450 mm	0,12	3309,86	02.3.D.010	60	12,69		424,03	02.0.2.0150	0,48	
<b>Tak</b>										1000,33
<i>Isolasjonstykkelse</i>										
200 mm	0,18	795,6	02.6.A.020	60	9,22		525,6	02.0.B.012	0	
230 mm	0,16	1468,2	02.6.A.021	60	13,45		683,6	02.0.B.012	0,15	
300 mm	0,13	1611,8	02.6.A.025	60	15,37		683,6	02.0.B.012	0,15	
400 mm	0,1	2352,2	02.6.A.026	60	22,16		683,6	02.0.B.012	0,15	
500 mm	0,08	2869,6	02.6.A.027	60	27,28		683,6	02.0.B.012	0,15	

<b>Gulv på grunn</b>										1000
<i>Isolasjonstykkelse</i>										
200 mm	0,18	828	02.5.A.002	100	10,24	1806,6	02.0.B.008	0		
250 mm	0,16	1482,63	02.5.A.003	100	12,8	2351,6	02.0.B.008	3,09		
300 mm	0,13	1617	02.5.A.004	100	15,36	2351,6	02.0.B.008	3,09		
450 mm	0,08	2560,63	02.5.A.010	100	23,04	2351,6	02.0.B.008	3,09		
<b>Solskjerming</b>	<b>Farge</b>									
Markisolette M3911	Svart	16305	02.3.7.0130	20	24,93	16289,4	02.0.D.003	4,11		
Markisolette M3933	Bronse	16305	02.3.7.0130	20	24,93	16289,4	02.0.D.003	4,11		
Markisolette M6544	Grå	16305	02.3.7.0130	20	24,93	16289,4	02.0.D.003	4,11		

Solskjerming	Solfaktor	Soltransmisjon	Solrefleksjon	Solabsorpsjon
Markisolette M3911	0,12	0,06	0,05	0,89
Markisolette M3933	0,12	0,07	0,08	0,85
Markisolette M6544	0,13	0,14	0,47	0,39

Energi	Fjernvarme, S + W [kWh]	EH [kg CO <sub>2</sub> /kWh]	Elektrisitet, E [kWh]	EE [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	CH [kr/kWh] eks mva.	CE [kr/kWh] eks mva.	Df [%]	Vedlikehold og rivning [kr]	Material/Demontering [kgCO <sub>2</sub> eq]	LCC [kr]	LCC [kr/m <sup>2</sup> ]
Referansebygg	70637	0,225	257655,3	0,017	0,86	0,999	22,63	20473526,21	165454,31	24793305,33	8433
Henvisning	Ref. Modell	SIN TEF Prosjektrapport	Ref. Modell	<a href="https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/stromforbruk-i-norge-har-lavt-klimagassutslipp/">https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/stromforbruk-i-norge-har-lavt-klimagassutslipp/</a>	<a href="https://www.ssb.no/fjernvarme">https://www.ssb.no/fjernvarme</a>	<a href="https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikk/er/elkraftpris">https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikk/er/elkraftpris</a>	EXCEL-ber. ((23814+33548+3954,9)*251,16+(820+325)*976,05+(795,6+525,6)*1000,3+(828+1806)*1000)	EXCEL-ber. (278,99*2+1,37)*251,16+(5,64*976,05)+(9,22*1000,33)+(10,24*1000)	EXCEL-ber. ((70637*0,86+257655,3*0,999)*0,225+24793305,33+20473526,21)	EXCEL-ber. (70637*0,225+2	EXCEL-ber. (70637*0,225+2
										LCCf [kgCO <sub>2</sub> eq]	LCCf [kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> ]
										1381862,217	470
										EXCEL-ber. (70637*0,225+2	EXCEL-ber. (70637*0,225+2





# Vedlegg C Grafer for tilstedeværelse, belysning og utstyr

**Schedule**

Name: Office-real-Primary-Occupancy

Rules

```
Sun,Hol: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Saturday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Monday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Tuesday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Wednesday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Thursday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
All days: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
```

Data for selected rule:

Valid days:  Mon  Wed  Fri  Sun  Tue  Thu  Sat  Holidays

Schedule description: Occupancy

**Schedule**

Name: 06-18 Technical Equipment ny

Rules

```
Weekends & Holidays: 0
All days: 1 [6-18], 0 otherwise
```

Data for selected rule:

Valid days:  Mon  Wed  Fri  Sun  Tue  Thu  Sat  Holidays

Schedule description: On weekdays 6-18, otherwise off

**Schedule**

Name: Office-real-Primary-lighting

Rules

```
Sun,Hol: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Saturday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Monday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Tuesday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Wednesday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
Thursday: Profile = ((0 0) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
All days: Profile = ((0.0 0.011904762) (0.25 0) (0.5 0) (0.75 0) (1.0 0) (1.25 0) (1.5 0))
```

Data for selected rule:

Valid days:  Mon  Wed  Fri  Sun  Tue  Thu  Sat  Holidays

Schedule description: Occupancy

**Schedule**

Name: CAV Schedule - Primær areal 2.88 and 5 l/s

Rules

```
Weekends & Holidays: 0.2
from 15 Apr to 15 Sep Workdays: Profile = Cav - Cellekontor 03 (rule-3)
All days: 2.3 [6-18], 0.2 otherwise
```

Data for selected rule:

Valid days:  Mon  Wed  Fri  Sun  Tue  Thu  Sat  Holidays

Schedule description:

**Schedule**

Name: CAV Schedule - Sekundær areal 1.4 l/s

Rules

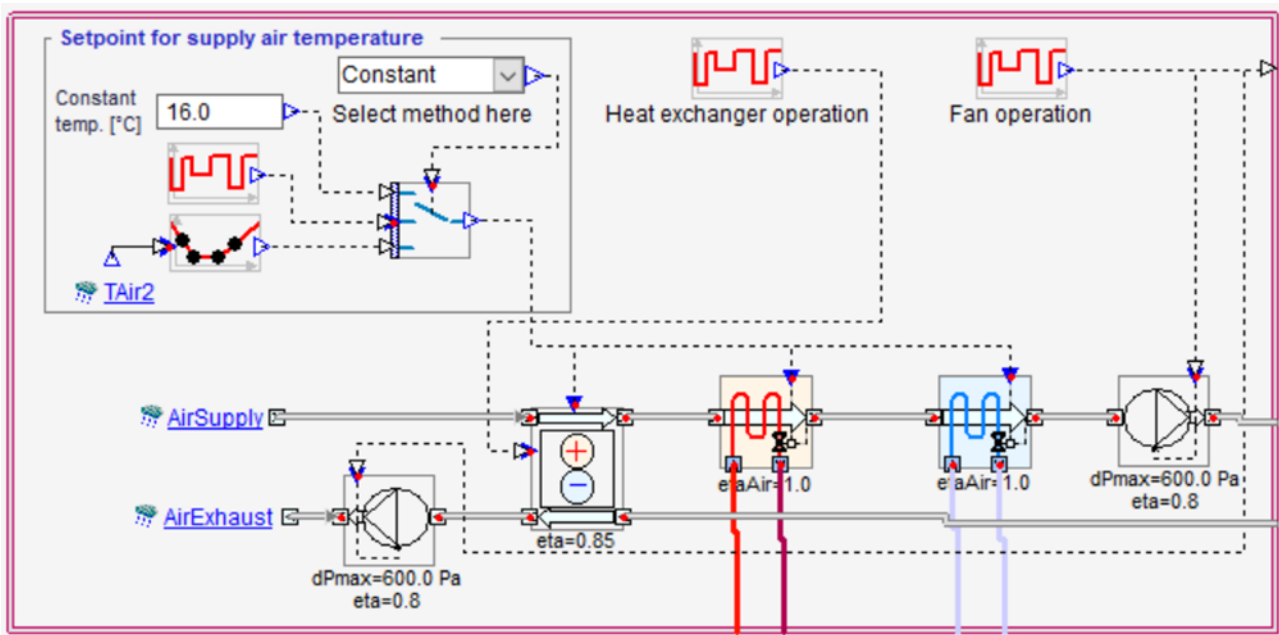
```
Weekends & Holidays: 0.2
from 15 Apr to 15 Sep Workdays: Profile = CAV - 1.4 l/s (rule-3)
All days: Profile = CAV - 1.4 l/s
```

Data for selected rule:

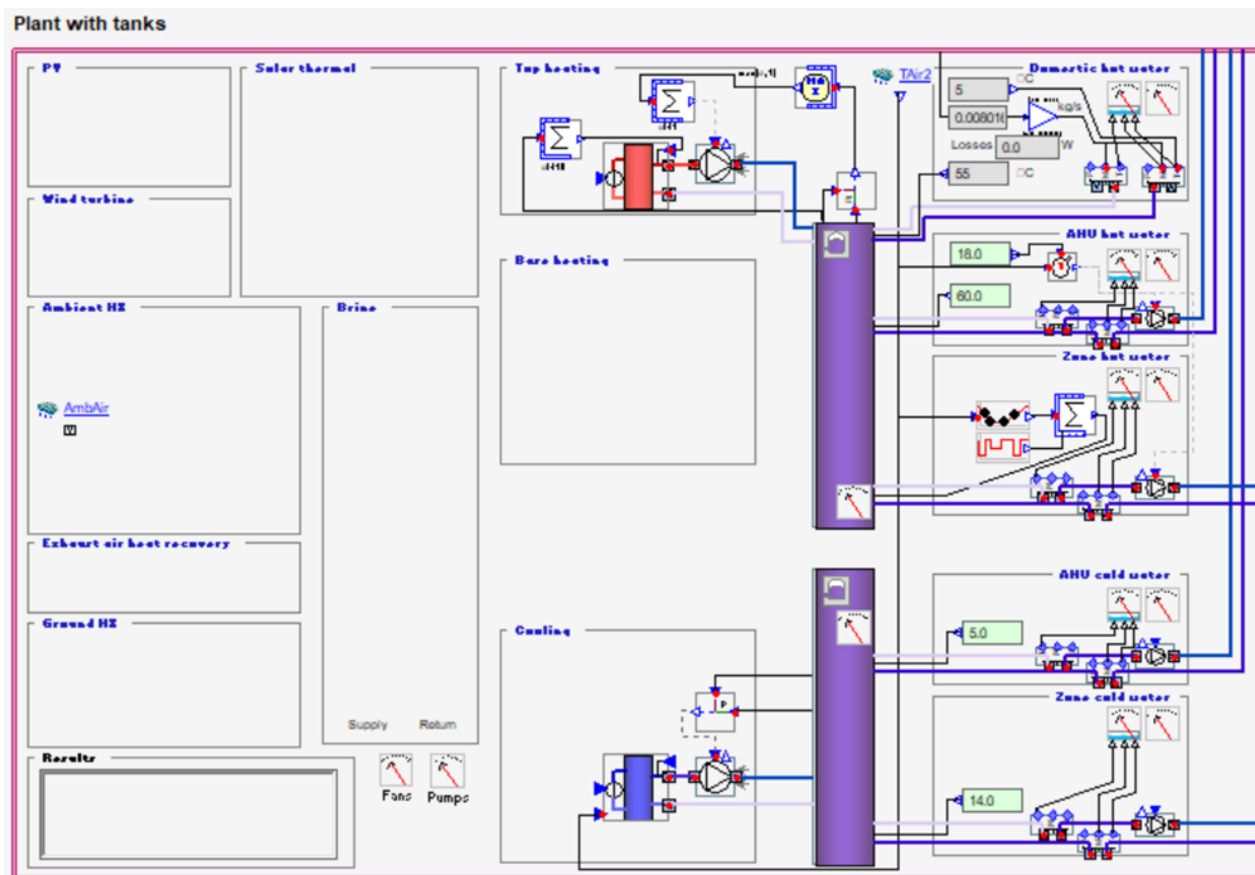
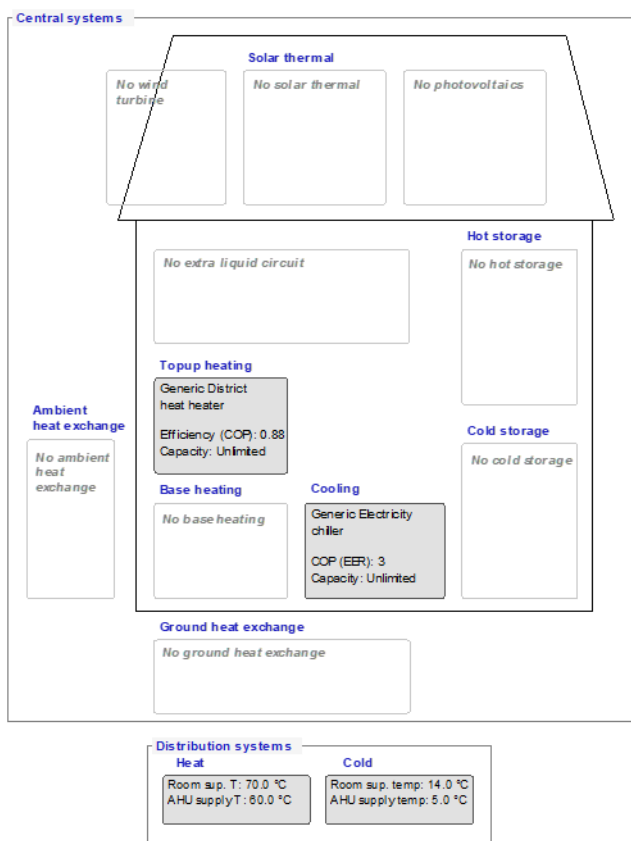
Valid days:  Mon  Wed  Fri  Sun  Tue  Thu  Sat  Holidays

Schedule description:

# Vedlegg D Ventilasjonsaggregat

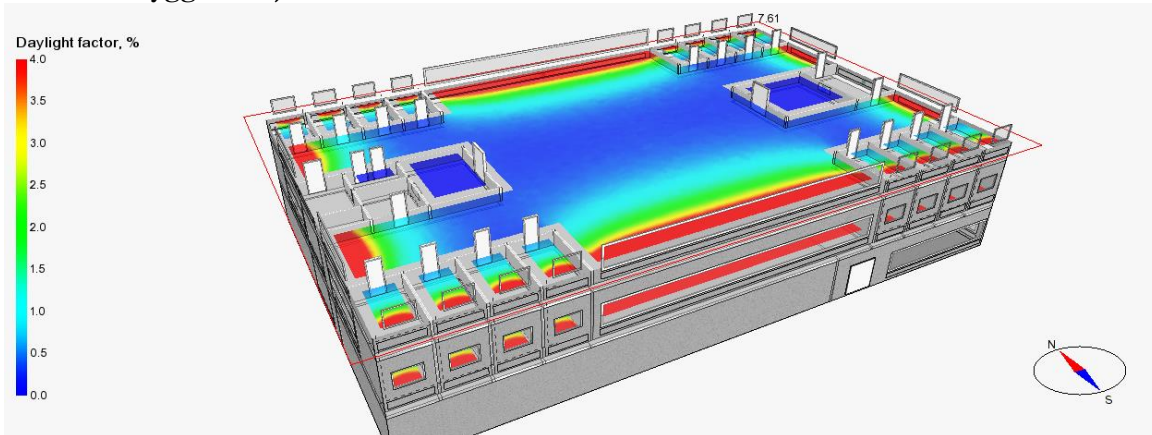


# Vedlegg E Oppvarming og kjølesystem bygningsnivå

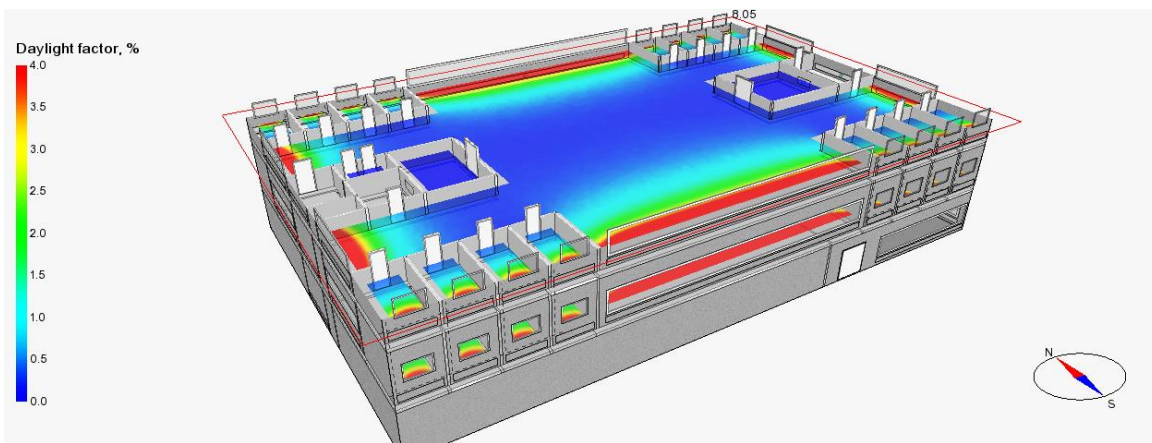


# Vedlegg F Resultater Dagslys

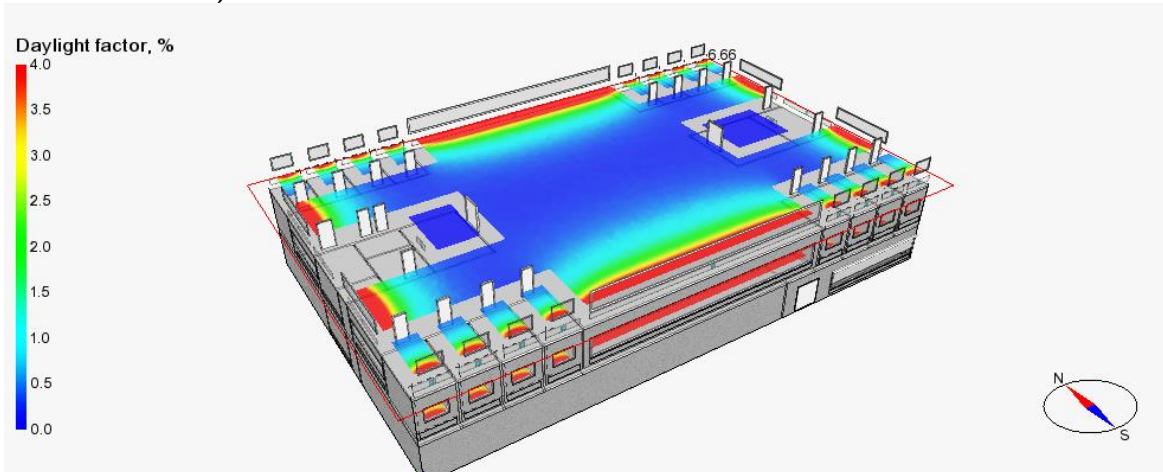
## Referanse bygg 3 etasje Før tiltak



## Scenario 1 3. etasje Etter tiltak

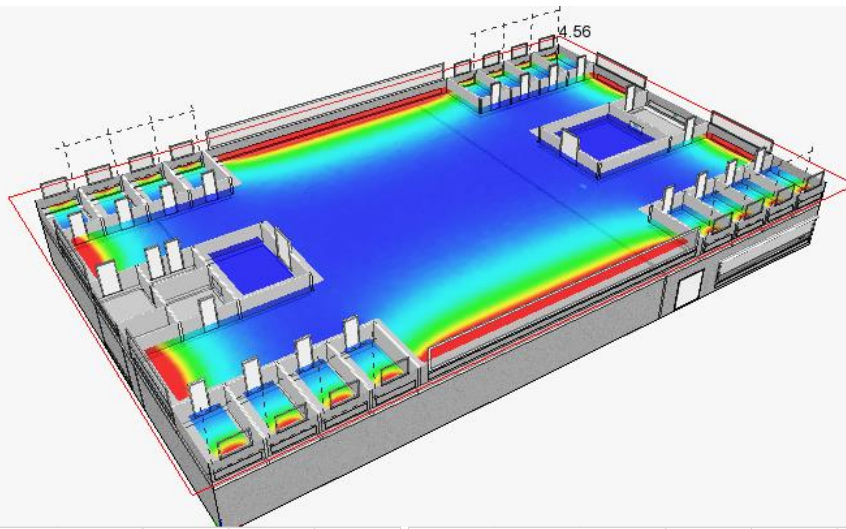
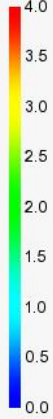


## Scenario 2 3. etasje Etter tiltak



## Scenario 3 3. etasje Etter tiltak

Daylight factor, %



Resultater Dagslys for Referanse bygning

Zone	Group	Median daylight factor, %	Avg daylight factor, %	Min daylight factor, %	Max daylight factor, %	UR (daylight factor)
Cubicle - 3rd Floor South -		1,355	2,147	0,5731	7,504	0,267
Cubicle - 3rd Floor South -		1,362	2,142	0,5684	7,453	0,2653
Cubicle - 3rd Floor South -		1,351	2,142	0,5768	7,452	0,2692
Cubicle - 3rd Floor South -		1,378	2,143	0,5701	7,485	0,266
Meeting Room 3rd Floor		0,002958	0,002951	0,00276	0,003021	0,9355
Cubicle - 3rd Floor South -		1,355	2,141	0,5746	7,46	0,2684
Cubicle - 3rd Floor South -		1,353	2,142	0,5773	7,454	0,2695
Cubicle - 3rd Floor South -		1,36	2,142	0,5722	7,495	0,2671
Cubicle - 3rd Floor South -		1,353	2,146	0,5728	7,464	0,2669
Conference Room South 3		0,003407	0,00338	0,003074	0,003561	0,9097
Cubicle - 3rd Floor North -		1,376	2,153	0,5749	7,454	0,2671
Cubicle - 3rd Floor North -		1,365	2,148	0,5722	7,499	0,2664
Cubicle - 3rd Floor North -		1,378	2,153	0,5754	7,498	0,2672
Cubicle - 3rd Floor North -		1,371	2,14	0,5641	7,456	0,2635
Cubicle - 3rd Floor North -		1,354	2,144	0,5757	7,473	0,2686
Cubicle - 3rd Floor North -		1,363	2,146	0,5732	7,518	0,2671
Cubicle - 3rd Floor North -		1,382	2,147	0,5654	7,547	0,2633
Cubicle - 3rd Floor North -		1,371	2,141	0,5717	7,481	0,2671
Open Office 3rd Floor		0,4324	1,244	0,2549	13,91	0,2048
Open Office 2nd Floor		0,389	1,233	0,2124	14,14	0,1723
Cubicle - 2nd Floor North -		1,436	2,2	0,5973	7,556	0,2715
Meeting Room 2nd Floor		0,003939	0,003928	0,003428	0,004167	0,8727
Cubicle - 2nd Floor North -		1,446	2,196	0,5976	7,518	0,2722
Cubicle - 2nd Floor North -		1,417	2,19	0,5935	7,563	0,271
Cubicle - 2nd Floor North -		1,431	2,196	0,5981	7,52	0,2723
Cubicle - 2nd Floor North -		1,412	2,197	0,597	7,581	0,2718
Cubicle - 2nd Floor North -		1,443	2,194	0,5954	7,506	0,2714
Cubicle - 2nd Floor North -		1,41	2,197	0,5985	7,596	0,2724
Cubicle - 2nd Floor North -		1,443	2,204	0,5991	7,581	0,2718
Cubicle - 2nd Floor South -		1,428	2,191	0,5928	7,537	0,2706
Cubicle - 2nd Floor South -		1,409	2,188	0,5959	7,515	0,2723
Cubicle - 2nd Floor South -		1,427	2,19	0,5976	7,549	0,2729
Cubicle - 2nd Floor South -		1,422	2,197	0,5959	7,552	0,2712
Cubicle - 2nd Floor South -		1,415	2,195	0,5996	7,574	0,2732
Cubicle - 2nd Floor South -		1,408	2,19	0,597	7,554	0,2726
Cubicle - 2nd Floor South -		1,428	2,191	0,5924	7,517	0,2704
Conference Room South 2		0,004107	0,00407	0,003512	0,00438	0,863
Cubicle - 2nd Floor South -		1,446	2,195	0,5932	7,604	0,2703

Resultater Dagslys for Scenario 1

Zone	Group	Median daylight factor, %	Avg daylight factor, %	Min daylight factor, %	Max daylight factor, %	UR (daylight factor)
Cubicle - 3rd Floor South -		0,9589	1,409	0,4188	4,486	0,2971
Cubicle - 3rd Floor South -		0,9512	1,407	0,415	4,497	0,2949
Cubicle - 3rd Floor South -		0,9629	1,407	0,414	4,47	0,2942
Cubicle - 3rd Floor South -		0,9542	1,408	0,4166	4,473	0,296
Meeting Room 3rd Floor		0,002439	0,00243	0,002272	0,002498	0,935
Cubicle - 3rd Floor South -		0,949	1,41	0,4162	4,513	0,2953
Cubicle - 3rd Floor South -		0,9453	1,407	0,4169	4,51	0,2963
Cubicle - 3rd Floor South -		0,9521	1,408	0,416	4,493	0,2955
Cubicle - 3rd Floor South -		0,9523	1,407	0,4194	4,485	0,2981
Conference Room South 3		0,002402	0,002396	0,002184	0,002517	0,9114
Cubicle - 3rd Floor North -		0,9472	1,407	0,4141	4,488	0,2943
Cubicle - 3rd Floor North -		0,9415	1,405	0,4114	4,466	0,2929
Cubicle - 3rd Floor North -		0,9593	1,409	0,4134	4,497	0,2934
Cubicle - 3rd Floor North -		0,9497	1,405	0,4145	4,463	0,295
Cubicle - 3rd Floor North -		0,9444	1,408	0,4147	4,501	0,2946
Cubicle - 3rd Floor North -		0,9547	1,405	0,4135	4,485	0,2942
Cubicle - 3rd Floor North -		0,9561	1,402	0,4132	4,501	0,2946
Cubicle - 3rd Floor North -		0,9483	1,41	0,4127	4,5	0,2927
Open Office 3rd Floor		0,3271	0,8813	0,1882	9,29	0,2135
Open Office 2nd Floor		0,2922	0,8722	0,1546	9,406	0,1773
Cubicle - 2nd Floor North -		0,9906	1,443	0,4296	4,534	0,2976
Meeting Room 2nd Floor		0,002979	0,002972	0,002649	0,003153	0,8911
Cubicle - 2nd Floor North -		1,003	1,451	0,4324	4,555	0,2979
Cubicle - 2nd Floor North -		0,9889	1,44	0,4284	4,509	0,2976
Cubicle - 2nd Floor North -		0,9998	1,446	0,4324	4,547	0,2991
Cubicle - 2nd Floor North -		0,9821	1,444	0,4328	4,549	0,2997
Cubicle - 2nd Floor North -		0,9923	1,444	0,4305	4,564	0,2982
Cubicle - 2nd Floor North -		0,9818	1,445	0,4322	4,532	0,2991
Cubicle - 2nd Floor North -		0,9928	1,445	0,433	4,532	0,2997
Cubicle - 2nd Floor South -		0,9902	1,447	0,4353	4,507	0,3008
Cubicle - 2nd Floor South -		0,9845	1,438	0,4311	4,514	0,2998
Cubicle - 2nd Floor South -		1,005	1,442	0,4328	4,529	0,3002
Cubicle - 2nd Floor South -		1,001	1,445	0,4334	4,535	0,3
Cubicle - 2nd Floor South -		0,9949	1,448	0,4369	4,529	0,3017
Cubicle - 2nd Floor South -		0,994	1,44	0,4289	4,554	0,2978
Cubicle - 2nd Floor South -		1,005	1,453	0,4356	4,508	0,2997
Conference Room South 2		0,003049	0,003005	0,00252	0,003264	0,8388
Cubicle - 2nd Floor South -		0,9973	1,443	0,4352	4,538	0,3017

Resultater Dagslys for Scenario 2						Resultater Dagslys for Scenario 3							
Zone	Group	Median	Max				Zone	Group	Median	Max			
		daylight factor, %	Avg daylight factor, %	Min daylight factor, %	daylight factor, %	UR (daylight factor)			daylight factor, %	Avg daylight factor, %	Min daylight factor, %	daylight factor, %	UR (daylight factor)
Cubicle - 3rd Floor South		1,082	1,673	0,4544	5,795	0,2716	Cubicle - 3rd Floor South		0,9557	1,419	0,4229	4,493	0,298
Cubicle - 3rd Floor South		1,075	1,673	0,4507	5,772	0,2693	Cubicle - 3rd Floor South		0,9467	1,402	0,408	4,46	0,291
Cubicle - 3rd Floor South		1,074	1,669	0,45	5,748	0,2696	Cubicle - 3rd Floor South		0,9433	1,405	0,4154	4,468	0,2957
Cubicle - 3rd Floor South		1,079	1,675	0,4561	5,767	0,2722	Cubicle - 3rd Floor South		0,9574	1,404	0,4141	4,48	0,295
Meeting Room 3rd Floor		0,002405	0,00239	0,002157	0,002534	0,9022	Meeting Room 3rd Floor		0,002538	0,002529	0,002382	0,002598	0,942
Cubicle - 3rd Floor South		1,076	1,672	0,4542	5,793	0,2717	Cubicle - 3rd Floor South		0,9525	1,408	0,421	4,504	0,299
Cubicle - 3rd Floor South		1,07	1,667	0,449	5,75	0,2694	Cubicle - 3rd Floor South		0,9496	1,406	0,4155	4,484	0,2956
Cubicle - 3rd Floor South		1,078	1,671	0,4523	5,791	0,2707	Cubicle - 3rd Floor South		0,9455	1,407	0,4176	4,474	0,2968
Cubicle - 3rd Floor South		1,073	1,678	0,459	5,779	0,2735	Cubicle - 3rd Floor South		0,9493	1,412	0,4182	4,504	0,2962
Conference Room South 3		0,002659	0,002637	0,002366	0,002788	0,8971	Conference Room South 3		0,002676	0,002655	0,002382	0,002798	0,8973
Cubicle - 3rd Floor North		1,066	1,676	0,4539	5,769	0,2708	Cubicle - 3rd Floor North		0,9603	1,414	0,413	4,534	0,2921
Cubicle - 3rd Floor North		1,072	1,671	0,4533	5,781	0,2712	Cubicle - 3rd Floor North		0,9617	1,407	0,4153	4,474	0,2951
Cubicle - 3rd Floor North		1,06	1,669	0,4506	5,739	0,27	Cubicle - 3rd Floor North		0,9595	1,405	0,412	4,481	0,2932
Cubicle - 3rd Floor North		1,094	1,68	0,4526	5,76	0,2694	Cubicle - 3rd Floor North		0,9605	1,409	0,4149	4,514	0,2945
Cubicle - 3rd Floor North		1,083	1,676	0,4512	5,795	0,2692	Cubicle - 3rd Floor North		0,9536	1,406	0,4133	4,481	0,2939
Cubicle - 3rd Floor North		1,062	1,673	0,4516	5,795	0,2699	Cubicle - 3rd Floor North		0,9497	1,407	0,4113	4,49	0,2922
Cubicle - 3rd Floor North		1,076	1,668	0,447	5,746	0,2679	Cubicle - 3rd Floor North		0,9513	1,41	0,4147	4,496	0,2942
Cubicle - 3rd Floor North		1,075	1,672	0,4523	5,756	0,2705	Cubicle - 3rd Floor North		0,9499	1,408	0,4145	4,478	0,2945
Open Office 3rd Floor		0,3366	0,9659	0,1951	10,73	0,202	Open Office 3rd Floor		0,3261	0,8807	0,1844	9,315	0,2094
Open Office 2nd Floor		0,3045	0,9574	0,1579	10,85	0,1649	Open Office 2nd Floor		0,292	0,8726	0,16	9,416	0,1833
Cubicle - 2nd Floor North		1,118	1,712	0,4716	5,866	0,2754	Cubicle - 2nd Floor North		0,9949	1,439	0,4277	4,541	0,2971
Meeting Room 2nd Floor		0,002984	0,002978	0,002669	0,003152	0,8961	Meeting Room 2nd Floor		0,003087	0,003082	0,002784	0,003262	0,9033
Cubicle - 2nd Floor North		1,12	1,712	0,4689	5,846	0,2739	Cubicle - 2nd Floor North		1,007	1,446	0,4333	4,569	0,2996
Cubicle - 2nd Floor North		1,116	1,709	0,4669	5,794	0,2731	Cubicle - 2nd Floor North		0,9863	1,438	0,4267	4,547	0,2967
Cubicle - 2nd Floor North		1,127	1,71	0,4715	5,84	0,2757	Cubicle - 2nd Floor North		0,9934	1,445	0,4341	4,521	0,3004
Cubicle - 2nd Floor North		1,132	1,719	0,4765	5,796	0,2773	Cubicle - 2nd Floor North		0,996	1,442	0,4297	4,542	0,298
Cubicle - 2nd Floor North		1,107	1,71	0,4674	5,829	0,2733	Cubicle - 2nd Floor North		0,9461	1,392	0,3966	4,453	0,2849
Cubicle - 2nd Floor North		1,113	1,708	0,4655	5,794	0,2725	Cubicle - 2nd Floor North		0,9277	1,393	0,3962	4,487	0,2845
Cubicle - 2nd Floor North		1,124	1,71	0,4672	5,823	0,2731	Cubicle - 2nd Floor North		0,9459	1,399	0,4001	4,473	0,286
Cubicle - 2nd Floor South		1,11	1,704	0,4678	5,826	0,2746	Cubicle - 2nd Floor South		0,9456	1,4	0,4011	4,466	0,2866
Cubicle - 2nd Floor South		1,126	1,706	0,464	5,787	0,272	Cubicle - 2nd Floor South		0,9427	1,392	0,3944	4,473	0,2832
Cubicle - 2nd Floor South		1,124	1,715	0,474	5,81	0,2764	Cubicle - 2nd Floor South		0,9322	1,394	0,3963	4,493	0,2843
Cubicle - 2nd Floor South		1,124	1,716	0,4775	5,835	0,2782	Cubicle - 2nd Floor South		0,9465	1,401	0,3987	4,512	0,2845
Cubicle - 2nd Floor South		1,109	1,707	0,4691	5,809	0,2748	Cubicle - 2nd Floor South		0,9428	1,397	0,4043	4,445	0,2893
Cubicle - 2nd Floor South		1,111	1,707	0,4709	5,799	0,2759	Cubicle - 2nd Floor South		0,9427	1,396	0,3983	4,501	0,2854
Cubicle - 2nd Floor South		1,115	1,704	0,4684	5,804	0,2748	Cubicle - 2nd Floor South		0,9306	1,4	0,4013	4,499	0,2868
Conference Room South 2		0,00317	0,003146	0,002733	0,003379	0,8688	Conference Room South 2		0,002198	0,002185	0,002017	0,002304	0,9235
Cubicle - 2nd Floor South		1,118	1,714	0,4717	5,835	0,2751	Cubicle - 2nd Floor South		0,9436	1,394	0,3999	4,485	0,2868

