



KANDIDAT NR. 15

TILGJENGELIGHET: Åpen

**OsloMet – storbyuniversitetet**

Telefon: 67 23 50 00

**Institutt for Bygg- og energiteknikk - Bygg**

www.oslomet.no

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

# Masteroppgave

<b>MASTEROPPGAVENS TITTEL:</b> Optimalisering av klimaskjerm og ventilasjonsparametere i et eksisterende kontorbygg	<b>DATO</b> 23.05.2019
	<b>ANTALL SIDER 64 / ANTALL VEDLEGG 7</b>
<b>FORFATTERE:</b> Omid Mohseni	<b>VEILEDERE:</b> Mehrdad Rabani (OsloMet) Habtamu Bayera Madessa (OsloMet)
<b>SAMMENDRAG</b> Denne forskningsoppgaven har tatt for optimalisering av et renoveringsbygg i kategorien kontorbygg. Optimaliseringen har prøvd å redusere livsykluskostnader tilknyttet dette bygget og løfte den fra TEK10 til passivhus nivå. Forskningen er simuleringsbasert og bruker programmer oms IDA ICE 4.8 og GenOpt til dette formålet. Det laget egne koder til denne oppgaven som er implementert i simuleringsverktøyene anvendt. Referansebyggene er forsket på i 3 forskjellige klima i Norge. Resultatene viser at det er fullt mulig å tilfredsstille høye energi krav stilt i passivhusstandarden, uten å måtte ha alle kritiske parametere skiftet ut. Både energi- og kostnadsreduksjonen er av betydelig størrelse. Forskningen har også vist at denne optimaliseringen vil har forskjellige resultater i forskjellige klima.	

<b>3 STIKKORD</b>
Kontorbygg
Optimalisering
Livsykluskostnader



# Innholdsfortegnelse

1	Bakgrunn	1
1.1	Innledning	2
1.2	Tidligere arbeid	3
1.3	Mål for oppgaven	4
1.4	Begrensninger	4
2	Teori	5
2.1	Standarder og tekniske forskrifter	5
2.2	Klima	8
2.3	Relevante simuleringsverktøy	9
2.4	Optimaliseringsverktøy	11
2.5	IDA ICE og GenOpt samspill	12
3	Metode	15
3.1	Referansebygg	15
3.2	Inndeling av soner i referansebygget	18
3.3	Simuleringsverktøy	19
3.4	Inndata	19
3.5	Optimaliseringsprosess	26
3.6	Fremgangsmetoden	36
4	Resultat og diskusjon	40
4.1	Energibruk i referansebygget	40
4.2	Optimaliseringsresultater	43
4.3	Energi og temperaturer	46
4.4	Parametriske resultater	54
4.5	Vurdering av LCC	54
5	Konklusjon	58

6 Forslag til videre arbeid	59
Litteraturliste	60
Vedlegg	1
A	1
B	2
C	3
D	4
E	5

## **Forord**

Denne masteroppgaven er gjennomført våren 2019 ved OsloMet – storbyuniversitetet.

Oppgavens tema er utarbeidet av stipendiat Mehrdad Rabani (OsloMet – storbyuniversitetet) og førsteamanuensis Habtamu Bayera Madessa (OsloMet – storbyuniversitetet). Formålet med oppgaven er å forske på en simulering- og optimaliseringsmetodikk som kan anvendes til å minimere livsykluskostnader til renoveringsbygg (kontorbygg). Metoden bygger seg på tidligere forskning i dette feltet, men bruker grafisk skript i optimaliseringsprosessen.

Jeg vil sende en spesiell takk min veileder stipendiat Mehrdad Rabani, for veldig nyttig faglig veiledning, og støtte. Enda en takk til sideveileder, førsteamanuensis Habtamu Bayera Madessa for gode konstruktive møter og til tider støtte utenfor skolens arbeidstid.

En stor takk til familien min, venner og medstudenter for å ha støttet meg gjennom den lærerike perioden.

## Sammendrag

Denne forskningsoppgaven har tatt for seg optimalisering av et eksisterende kontorbygg. Målet av optimaliseringen har vært å vurdere om det er mulig å oppgradere dette bygge, ved å endre på kritiske parametere i klimaskjermen samt ventilasjonssettpunkter, for å nå energikrav stilt i passivhusstandarden NS 3701 (kontorbygg). Først var en 3D modell av bygget konstruert i IDA ICE 4.8 (IDA Indoor Climate and Energy) og energisimulert, med plassering i 3 forskjellige klima (Oslo, Stavanger og Tromsø), for å kartlegge energidata fra dette referansebygget. Deretter ble 2 scenarier av bygget, et med kun klimaskjerm og et med klimaskjerm og ventilasjonsvarme, satt opp. Før optimaliseringen ble et egenutviklet grafisk skript benyttet til å håndtere livssyklus-kostnader av bygget. Simuleringsverktøyet GenOpt ble, sammen med IDA ICE og det skriptet, anvendt til optimalisering av modellene med klimadata fra de aktuelle byene. Komfortkriterier som PMV ( $-0,7 < PMV < 0,7$ ) og operativtemperaturer ( $T > 26^{\circ}\text{C}$  ikke mer enn 50 timer) ble brukt som begrensning som skulle tilfredsstilles.

Resultater fra alle simuleringsmodeller (Referansebygg, 2 optimaliseringsmodeller og 2 fullverdige passivhusmodeller) ble sammenlignet mot hverandre i hver(t) by/klima. Dette med hensyn til både energiforbruk og livssyklus-kostnader beregnet av optimaliseringen.

Disse resultatene viste interessante funn. Noe av de første funnene var at referansebygget hadde veldig stor ytelsesforskjell i hvert klima. Tromsø hadde størst total energibruk og Stavanger det minste, hvor Oslo havnet i mellom. Optimalisering av referansebygget viste seg å ha stor effekt på energiforbruket og i noen klima gi litt bedre gjennomsnittlig operativtemperatur. Det største funnet var at livssyklus-kostnader knyttet til optimaliseringen var merkbare lavere enn det av passivhusmodellene. I et tilfelle (Stavanger) var energibruken tilsvarende det i passivhusmodellen. Resultatene viste også at med optimaliseringen ble oppvarmingsbehovet til bygget redusert, samtidig som energibehovet til kjøling økte.

Oppsummert viste optimaliseringsresultatene at det faktisk er mulig å oppgradere et eksisterende kontorbygg til passivhusstandard, uten å måtte forbedre hver eneste alle parametere.

## Abstract

This research study has addressed the optimization of an existing office building. The goal of the optimization has been to assess whether it is possible to upgrade the case study building, by changing critical parameters in the building envelope and ventilation set points, in order to reach energy requirements, set in the passive house standard NS 3701 (office building). First, a 3D model of the building was constructed in IDA ICE 4.8 (IDA Indoor Climate and Energy) and energy-simulated, with location in 3 different climates (Oslo, Stavanger and Tromsø), to map energy data from this reference building. Then two scenarios of the building were set up where, one with only a building envelope parameter and the other with a building envelope as well as all-air-heating system. Before the optimization, a proprietary graphic script was used to handle the life cycle costs of the building. The optimization tool GenOpt, together with the IDA ICE building performance software and that script, was used to optimize the models with climate data from the relevant cities. Comfort criteria such as PMV ( $-0.7 < \text{PMV} < 0.7$ ) and operating temperatures ( $T > 26^{\circ}\text{C}$  no more than 50 hours) were used as a restriction to be met.

Results from all simulation models (Reference building, 2 optimization models and 2 full passive house models) were compared against each other in each city / climate. This with regard to both energy consumption and life cycle costs (LCC) calculated by the optimization.

These results showed interesting findings. One of the first findings was that the reference building had very large performance differences in each climate. Tromsø had greatest total energy consumption and Stavanger the least, where Oslo came in between. Optimization of the reference building proved to have great effect on the energy consumption and in some climates slightly better average operating temperature. The biggest finding was that life cycle costs associated with optimization were noticeably lower than that of the passive house models. In one case (Stavanger), the energy consumption was similar to that of the passive house model. It also showed that by having a better building envelope the heating load required by the building is reduced while the cooling load required is increased.

In summary, the optimization results showed that it is actually possible to upgrade an existing office building to the passive house standard, without having to improve every single parameter.

# 1 Bakgrunn

Alle former for energi er en nøkkelingrediens i dagens høy teknologiske samfunn. Kanskje den viktigste ingrediensen, da energiforbruket i våre samfunn øker høyt tempo, samtidig som det er større fokus på miljø og klimaendringer. Industrialisering og modernisering av byer har og vil fortsatt føre til endring i behovet for energi, økt belastning på samfunnet og overforbruk av tilgjengelige ressurser. Med økt miljøfokus har også miljøkrav, satt av politikere, blitt strengere de siste par årene. Nye mål for energibruk og CO<sub>2</sub> utslipp er satt og disse kravene blir gradvis implantert i dagens samfunn. For å møte alle de nye miljøkravene, samt å redusere sløsing av dyrebare ressurser, må vi optimalisere eksisterende systemer så de yter maksimalt, før vi slår ned og gjenoppbygger.

Bygningssektoren og byggebransjen står for en stor andel av energiforbruket i dagens samfunn. Av den grunn, er svært viktig å forbedre energiforbruket i denne sektoren. En måte å gjøre dette på er å rive ned og bygge nye bygg med egenskaper som oppfyller regelverket. Men det er både dyrt og ugunstig. En annen måte er å renovere bygninger og optimalisere energibruken slik at bygningen kan oppfylle energi- og miljøkrav.

I forbindelse med denne oppgaven vil en 3D-modell av et typisk kontorbygg med alle dens egenskaper, bli utarbeidet i simuleringsprogrammet IDA-ICE. Deretter vil modellen energisimuleres i 3 forskjellige klima i Norge, basert på krav fra TEK10. Videre vil optimaliseringsverktøyet GenOpt bli benyttet til å sette opp en matrise av parametere som er av interesse for optimaliseringsformålet. Da vil f.eks. endring av isolasjonstykkelsen i ytterveggen, vinduskarakteristikken, settpunkter for oppvarming, kjøling (ventilasjon) og ventilasjonsluftmengder testes. Målet med optimaliseringen er å se redusere renoverings- og driftskostnader av bygget, samtidig som bygget skal oppfylle energi- og komfortkrav.



## 1.1 Innledning

Bygningssektoren er den største forbrukersektoren av energi i mange land og har en stor påvirkning på miljøet og omgivelsene [1]. I Norge står bygningsmassen for nærmere 40% av energibruken. Av den andelen er tjenesteytende bygninger ansvarlig for ca. 15% av det. Av den grunn, er det meget kritisk og essensielt at bygningssektoren redusere sitt energiforbruk for å bidra til med den bærekraftige utviklingen.

Den samme statistikken gjelder for andre europeiske land (EU) [2]. Forbedring av energiforbruk og effektivitet i bygninger er en viktig forutsetning for korrekt bevaring og rasjonell bruk av energi- og naturressurser, samt for å minimere miljøpåvirkningen. I tillegg er den økonomiske gevinsten av forbedret energieffektive teknologier i bygninger en viktig motivasjon for eiendoms-/bygningseiere. Måler er da å designe, drifte og vedlikeholde energieffektive og miljøvennlige bygg [3]. Det viktigste steget og den største utfordringen er å velge optimale byggstrategier som tilfredsstillende dagens og fremtidige krav til byggets energieffektivitet, innemiljøkvalitet og miljøpåvirkning. Samtidig skal disse strategiene redusere energikostnader og sikre at bygget prestasjon vedvarer gjennom hele livssyklusen.

Når den store variasjonen bygningskategori vurderes i sammenheng med bygningens energieffektivitet og andre prestasjonskriterier, blir vurdering av energieffektivitetsstrategier for et bestemt bygg kompleks og ganske vanskelig å gjennomføre. Et bygg sammen med dets omgivelser er komplekse systemer med tekniske, teknologiske, økologiske, termiske egenskaper hvor bygget totale prestasjon påvirkes av lang rekke av sammensatte delsystemer (som klimaskjermen, VVS-systemer osv.) [4].

Klimaskjermen spiller en stor rolle siden den har en kontinuerlig effekt på bygningens energiforbruk, innemiljø og miljøpåvirkning gjennom bygget levetid. Dette betyr at bygningens driftskostnader er direkte påvirket av materialvalg i konstruksjonen av klimaskjermen. Blant en rekke av valg for energieffektivitet og andre ytelseskriterier for bygninger, er den store utfordringen å bestemme den optimale og effektive sammensetningen med tiltak til bygningen, på lang sikt. Samtidig som det forskes på optimalisering av disse valgene, bør det, under prosjektering av bygg, tas større velveide kompromisser når flere aspekter som energi, komfort, miljøvern og økonomi vurderes. I byggebransjen anvendes ulike tilnærminger til å kartlegge omfanget av byggstrategier. Erfarne arkitekter bruker ofte tommelfingerregler til å bestemme bruksmønster og internlaste [5]. Disse beslutningsmetodene kan gi ineffektive løsninger. Den

andre tilnærmingen innebærer simuleringsbaserte energianalyser av flere mulige scenarier, for å finne et optimalt design. Selv om energisimuleringsverktøy som IDA ICE, TRNSYS, EnergyPlus osv. er meget nyttige verktøy til ytelsessimulering av bygg, men til optimaliseringsformål, vil de ikke fungere godt nok. Dette er siden en optimaliseringsprosess vil gjennomgå alle mulige scenarier av et bygg og finne ut hva som virker best til optimaliseringsformålet og dette er en tids- og ressurskrevende prosess. I den forbindelsen er optimaliseringsverktøy som GenOpt, MATLAB og slikt blitt brukt i samspill med energisimuleringsverktøyet, for å redusere tids- og ressurskravet.

## 1.2 Tidligere arbeid

Til denne forskningen er et bredt utvalg av forsøk og utgivelser blitt studert. En av dem er Chantrelle der han utviklet et optimaliseringsverktøy som heter MultiOpt basert på integrering av generisk algoritme (GA) NSGA-II. Dette i samspill med TRNSYS simuleringsverktøy, for å optimalisere et eksisterende skolebyggs energiforbruk, termisk komfort, miljøeffekt med kostnad som minimeringsmål. Alt dette ved å vurdere bygningens klimaskjerm og parametere til kontrollsystem [6]. Asadi bygget en multi-objektiv optimaliseringsmodell som brukte optimaliseringsverktøyet GenOpt sammen TRNSYS-energisimuleringsverktøy og MATLAB, for å identifisere et effektivt sett med alternativer for å definere energireparasjonskostnadene og bygge energibesparelser, og for å oppnå termisk komfort [7]. Verbeeck og Hens presenterte en global multi-objektiv optimaliseringsmetode som bruker flere objektive funksjoner til optimalisering med hensyn til energibesparelser, miljøpåvirkning og livsyklus-kostnader. Forskningen brukte energisimuleringsverktøyet TRNSYS sammen med MATLAB [8]. Hamdy integrert GA-basert multi-objektiv optimalisering forsøk med IDA ICE som simuleringsprogram for å optimalisere klimaskjerm og VVS systemparametere i tre forskjellige bygninger i forskjellige klima. Forskningens mål var å minimere bygningens CO<sub>2</sub> utslipp og investeringskostnader [9]. Karaguzel brukte energisimuleringsverktøyet EnergyPlus og optimaliseringsverktøyet GenOpt for å minimere livssyklus-kostnader til et kontorbygg ved å forbedre klimaskjermparametere [10].

Felles for disse forskninger, er at de bare har stort sett optimalisert byggets klimaskjermparametere med enten egenutviklet eller eksisterende optimaliseringsverktøy. I denne oppgaven har forskningen gått litt videre og investigert om det er mulig å nå strenge energikrav også ved å optimalisere settpunkter, i tillegg til klimaskjermen. Samtidig er

livsyklus kostnader til bygget blitt simulert sammen med energisimuleringen. Dette er blitt gjort ved hjelp av egenutviklet grafisk skript i energisimuleringsverktøyet.

### **1.3 Mål for oppgaven**

Målet med denne oppgaven er som nevnt i innledningen:

- Konstruere og energisimulere et typisk, eksisterende kontorbygg ved hjelp av et bygningssimuleringsverktøy.
- Å optimalisere/renovere dette bygget mot passivhusstandard for publikum og tjenesteytende bygg. Bygget skal få forbedret klimaskjerm, samt at tekniske systemer skal yte optimalt. Optimaliseringen skal minimere kostnaden tilknyttet dette tiltaket for å finne ut av hva som må forbedres for å tilfredsstille energikrav stilt i passivhusstandarden. Dette skal selvfølgelig ikke gå på bekostning av komfort i bygget, noe som er skal tas hensyn til under begrensninger til simuleringer av bygget.

Til dette forsøket blir bygningssimuleringsprogrammet IDA ICE benyttet, da dette er et velkjent og godt anvendt verktøy i forskningsmiljøet og rådgivningsbransjen. Samtidig skal GenOpt brukes som optimaliseringsverktøy i samspill med IDA ICE.

### **1.4 Begrensninger**

Under litteraturstudien til denne oppgaven, er det tatt utgangspunkt i kostnadsoptimaliseringsstudier gjort av både norske, samt internasjonale forskere. Videre vil optimaliseringen foregå gjennom to scenarier, et hvor det ses på kun forbedring av bygningskallet og et hvor forbedring av ventilasjonsaggregatet også tas inn i bildet. Det er også blitt noen antakelser og forenklinger i forkant av hele oppgaven der:

- Det antas at leseren av denne forskningen har grunnleggende forståelse for både tekniske systemer i bygg, spesielt VVS og oppbygning av en byggkonstruksjon. Dette for å spare tid til gjennomføring av oppgavens viktigste mål.
- Bygningsmodellen er forenklet til det nivået som tillater å gjennomføre forskningen med tilgjengelig dataressurs og den begrensede tiden tilegnet til oppgaven.

## 2 Teori

I dette kapittelet er 5 tema blitt diskutert. I første delen er standarder og forskrifter relevant til denne forskningen blitt beskrevet med fokus klimaskjerm- og energikrav. Delkapittelet der igjen omhandler klima i aktuelle byer valgt ut for denne forskningen. Del kapitler 3, 4 og 5 henholdsvis omhandler simuleringsverktøy knyttet til energianalyse av bygninger, optimaliseringsverktøy og samhandlingen mellom utvalgte verktøy knyttet til denne forskningen.

### 2.1 Standarder og tekniske forskrifter

Forskrift om tekniske krav til byggverk trekker opp grensen for det minimum av egenskaper et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge [11]. Energikrav i ny tekniske forskrifter kommer på bakgrunn av politiske bestemmelser og EU direktiver. Tekniske forskrifter beskriver generelle ytelses- og funksjonskrav til bygninger. Med jevne mellomrom bør disse kravene oppdateres.

#### 2.1.1 TEK

TEK skal sikre at byggetiltak planlegges, prosjekteres og utføres med utgangspunkt i god visuell funksjon, universell fasong og sånn at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi [12]. Poenget med TEK er at prosjektering og oppføring av bygg skal være med utgangspunkt i lavest mulig energibruk. Dagens energikrav kan tilfredsstilles på følgende måter:

- Energirammemodellen
- Tiltaksmodellen

Ved å følge energirammemodellen skal byggets energiforbruk ikke overstige en viss størrelse, ut i fra bygningskategori. Tiltaksmetoden krever at alle tiltak bør tilfredsstilles. Det tillatt å omfordele med begge metoder, så lenge bygget holder seg innenfor minstekravene for energi i §14-3 [11].

Tek har blitt oppdatert jevnlig gjennom årene, og for hver oppdatering har energikravene blitt ytterligere strammet. Forskjellen mellom TEK 10 (2010) og TEK 17 kan fremstilles i Tabell 1 under.

Tabell 1 Forskjeller mellom TEK10 (2010) og TEK17 [11]

Type	TEK10 (2010)	TEK17 (endret til)
U-verdi yttervegg	0,18 [W/m <sup>2</sup> K]	Uendret
U-verdi tak	0,13 [W/m <sup>2</sup> K]	Uendret
U-verdi gulv	0,15 [W/m <sup>2</sup> K]	0,10 [W/m <sup>2</sup> K]
U-verdi vindu	1,2 [W/m <sup>2</sup> K]	0,8 [W/m <sup>2</sup> K]
Andel vindusareal av oppvarmet BRA	≤0,25	≤0,20
Normalisert kuldebroverdi, Ψ	0,06 [W/m <sup>2</sup> K]	0,07 [W/m <sup>2</sup> K]
Infiltrasjon ved 50 Pa, n <sub>50</sub>	2,5 h <sup>-1</sup>	0,6 h <sup>-1</sup>
SFP-faktor ventilasjonsvifter	2,50 [kW/m <sup>3</sup> /s]	1,5 [kW/m <sup>3</sup> /s]
Virkningsgrad av gjenvinner	70%	80%

### 2.1.2 NS 3031

NS 3031 er hovedstandarden benyttet til beregning av energibehov i bygninger og inkluderer standardiserte inndata og klimadata [13]. Standarden tar hensyn til alt som bruker energi slik som oppvarming, varmtvann, kjøling, vifter, pumper og belysning. Standarden gir regler for å beregne energieffektiviteten til varme- og kjølesystemene, og beregne levert energi til bygget.

NS 3031 kompletterer også de europeiske standardene som er utarbeidet for bygningsenergidirektivet. Standarden er tilpasset for å dokumentere mot energikrav i forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK) og for å beregne energiytelsen opp mot forskrift om energimerking av bygninger.

### 2.1.3 Passivhus standard

Utbredelsen og suksessen av passivhus begrepet har vært stor i mange europeiske land [14]. Dets strenge krav til både prosjektering og gjennomføring gjort at passivhus blir sett på moderne, miljøvennlig bygg med svært høy kvalitet, bra innklima og meget lavt energibehov. Kriterier for passivhus er fastsatt i Norsk Standard som gjelder både boliger (NS 3700) og yrkesbygninger (NS 3701). Inntil nå har det ikke eksistert en bestemt definisjon av passivhus

for norske forhold. Standardene NS 3700 og NS 3701, angir krav til passivhus og lavenergibygninger tilrettelagt for boligbygninger og yrkesbygninger.

Passivhusstandarden NS 3701, for yrkesbygninger, opererer med et maksimums spesifikt varmebehov som beregnes basert på klimadata fra geografiske plassering. Det vil si den årlige gjennomsnittlige temperaturen innhentet fra området. I tillegg tar det spesifikke varmebehovet hensyn til det totale oppvarmede arealet til bygget. Beregningen skiller mellom temperaturer over og under 6,3 °C og arealer over og under 1000 m<sup>2</sup>.

Hvis årlig gjennomsnittstemperaturen er større eller lik 6,3 °C og bygget gulvareal er under 1000 m<sup>2</sup>, blir det spesifikke varmebehovet kontorbygg beregnet slik som ligning 1 viser. Dersom byggets areal på 1000 m<sup>2</sup> eller over og årlig gjennomsnittstemperaturen fortsatt over eller lik 6,3 °C, er  $EP_{H,0}$  avlest fra tabell 5 i samme standarden, det spesifikke varmebehovet for bygget.

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

Om den årlige gjennomsnittstemperaturen under 6,3 °C og ligningene vist under, benyttes, der ligningen 2 er for bygg under og 3 over 1000 m<sup>2</sup>.

$$EP_{H,0} + X \frac{(1000 - A_{fl})}{100} + \left( K_1 + K_2 \frac{(1000 - A_{fl})}{100} \right) * (6,3 - \theta_{ym}) \quad (2)$$

$$EP_{H,0} + K_1(6,3 - \theta_{ym}) \quad (3)$$

Her er:

- $X$ : arealkoeffisient for oppvarmingsbehov oppgitt i tabell 5, i kWh/m<sup>2</sup>.år
- $K_1, K_2$ : klimakoeffisienter for oppvarmingsbehov oppgitt i tabell 5
- $A_{fl}$ : oppvarmet gulvareal i m<sup>2</sup>
- $\theta_{ym}$ : årsmiddeltemperaturen

Når det kommer til kjølebehovet, beregner denne standarden det etter dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold  $DUT_s$  for geografiske plasseringen av bygningen. Dersom  $DUT_s$  er over 20 °C, brukes ligning 4 til beregningen, og dersom  $DUT_s$  er under 20 °C er det spesifikke kjølebehovet link null.

$$\beta(DUT_s - 20) \quad (4)$$

Hvor:

- $\beta$ : kjølebehovskoeffisient avhengig av bygningskategori (oppgitt i tabell 7)

## 2.2 Klima

Klimaet i Norge er preget av store endringer mellom forskjellige landsdeler [15]. Fastlandet i Norge har et temperert klima enn det av på fjellområder. Kystområdene fra Oslofjorden til Troms er preget av et temperert regnklima med mild vinter. Innlandet har derimot et kaldt klima med og snødekke gjennom store deler av året. Allikevel har klimaet i Norge et mildere klima enn den nordlige beliggenheten skulle tilsa. Golfstrømmen og vind transporterer varme hit og er årsaken til dette klimaet i Norge. Tabell 2 viser gjennomsnittlig tørrkuletemperaturer fra 2017 [16]. Her viser tabellen at disse byene er ganske forskjellige temperaturmessig, spesielt på sommeren. Figur 1 viser også plassering av aktuelle byer for denne forskningen. Disse byene er valgt ut da de er plassert i øst, sør og nord.

Tabell 2: Månedlig oversikt av gjennomsnittlig tørrkuletemperaturer i Oslo, Stavanger og Tromsø.

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
<b>Oslo</b>	-2,7	-0,4	0,6	4,6	12,8	16	17,5	17	10,7	6,9	0,6	-2,6
<b>Stavanger</b>	2,2	2,4	3,6	6,7	9,4	12,5	14,2	15,4	13,2	9,4	4,7	4,2
<b>Tromsø</b>	-1,7	-2,3	-1,1	0,8	4,3	9,1	11,6	10,7	7,3	3,2	-0,2	-2,2



Figur 1: Geografisk plassering til tre aktuelle byer brukt i denne forskningen.

## 2.3 Relevante simuleringsverktøy

Over de siste 50-60 åra er det blitt utviklet, forbedret utallige simuleringsverktøy til energianalyse av bygninger, hvor mange er fortsatt i bruk i dag [17]. Et energisimuleringsverktøy vil kunne foreslå energiytelsen til bygg samt dets termiske forhold for brukerne av bygget. Alle bygningssimuleringsprogrammer har sine begrensninger og svakheter. Derfor er resultater fra slike verktøy er avhengig av kvaliteten og nøyaktigheten til inndata brukt under simuleringer. Alle simuleringsverktøy bruker matematiske ligninger til å foreta beregninger av termiske prosesser i bygget. Igjen, er disse ligningene ikke like nøyaktige som resultater fra virkeligheten. Dermed må det gjøres klart at virkelige data vil alltid noe avvike fra de simulerte.

### 2.3.1 IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE)

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) er et simuleringsverktøy for energianalyse av bygninger [18]. Programmet er utviklet av EQUA Simulations AB som er svensk. Programmet er bygget slik at hver eneste variable parameter kan logges og hver ligning kan inspiseres.



Programmet er basert på dynamiske beregninger av inneklima og energi i bygninger hvor matematiske modeller er skrevet i et språk kalt Neutral Modell Format (NMF). Fordelen med dette programmet er dets utrolig fleksible brukergrensesnitt oppå ligningsbaserte beregningsmetoder i kjernen. Dette gjør programmet veldig tilpasnings vennlig for akkurat det behovet man kan ha lokalt.

Systemet består vanligvis av en fler-sone modell, et oppvarmingssystem (Plant), samt et eller flere aggregater (AHU). IDA ICE kan utføre veldig detaljert periodisk og årlig dynamiske simuleringer med flere soner.

I IDA ICE er det også mulig å kjøre tilleggspakker som CFD og Borehole og nylig GenOpt. Det er flere versjoner av IDA ICE som er Standard, Expert og Viewer.

IDA ICE bruker data fra ASHRAE IWEC og IWEC 2 [19]. ASHRAE IWEC er en database som inneholder typisk værdata for 227 lokasjoner utenfor USA og Canada, og er basert på 18 år innsamling av data. ASHRAE IWEC 2 er en nyere database for senere versjoner av IDA ICE som inneholder værdata for 3012 lokasjoner utenfor USA og Canada. Datafilene er innhentet fra «Integrated Surface Hourly» (ISH) værdata so opprinnelig er arkivert i «National Climate Data Center».

### **2.3.2 EnergyPlus**

EnergyPlus er et generasjons bygningssimuleringsprogram basert på DOE-2 og BLAST, med mange flere muligheter [20]. Den ble utgitt i april 2001, og utviklet av flere amerikanske universiteter, med støtte fra US Department of Energy. EnergyPlus er et simuleringsprogram med åpen kildekode og uten et grafisk grensesnitt. Programmet er i stand til å foreta energisimulering av hele bygget. Det gir muligheten til å dimensjonere varme- og kjølebehov, foreta lysnivå, ventilasjon, varmtvannsforbruk. Samtidig gjør programmet det mulig å modellere forskjellige typer innebygde systemer og oppnå simuleringsresultater som den virkelige bygningen ville nådd. Den inneholder mange innovative simuleringsmuligheter, som tids-trinn mindre enn en time, modulære systemer og planter med integrert varmebalansebasert sonesimulering, luftstrømsanalyse av flere soner, termisk komfort, vannbruk, naturlig ventilasjon og fotovoltaiske systemer. Bygningsmodellen kan både modelleres i selve programmet eller bli importert fra andre modelleringsprogrammer.

### **2.3.3 TRNSYS**

TRNSYS, som står for Transient System Simulation Program, er et komplett og utvidbart simuleringsmiljø. Det er kommersielt tilgjengelig siden 1975 [21]. Det er et fleksibelt verktøy som tillater å simulere ytelsen til termiske systemer i bygningen. TRNSYS ble først utviklet mellom University of Wisconsin-Madison og Colorado State University på 1970-tallet. TRNSYS er algebraisk og differensialligningsbasert der komponentene kobles grafisk sammen i simuleringsprogrammet. Samtlige VVS-systemer og komponenter kalkuleres samtidig, ved bygningssimuleringer med klimaskjermens termiske balanse og luftstrømningsnettverket i bygget. Simuleringsresultater er komponentbaserte og kan hentes ut individuelt. Dette er nyttig for simulering av store komplekse modeller/bygninger. Programmet har en åpen kildekode, noe som gjør verktøyet og dets systemer meget fleksible og endringsvennlige.

### **2.3.4 SIMIEN**

SIMIEN er et norskutviklet simuleringsverktøy laget av Programbyggernes ANS. Selskapet er stiftet i 1993 og siden da har utviklet simuleringsverktøy benyttet til inneklimate- og energisimulering av bygg. SIMIEN deler bygget i forskjellige soner og hver sone har sin egen innputt av internlast og lokale systemer. På bygningsnivå er det mulig å sett inn et utvalg av bygningssystemer med mulighet til å endre kritiske parametere tilknyttet til hvert system. Et annet bruksområdet av programmet er dets mulighet til å sjekke resultattider av simuleringen mot tekniske forskrifter anvendt i Norge, samt dimensjonering av ventilasjon-, oppvarming- og kjølesystemer i bygget. Simuleringene gjort i SIMIEN er dynamiske og har muligheten til å simulere hele bygninger, soner, eller enkelte rom for seg selv.

Sammenlignet med programmer som IDA ICE, EnergyPlus og TRNSYS, er programmet ikke like avansert og fleksibelt. Det er ikke mulig for brukeren å definere egne kontroller og systemer. Dette er noe av svakheten til programmet. Derimot er programmet meget raskt og tidsbesparende for kontrollsimuleringer knyttet til forprosjekteringsformål og slikt.

## **2.4 Optimaliseringsverktøy**

Generiske optimaliseringsverktøy kan ideelt bli brukt sammen med mange simuleringsprogrammer [22]. Et par av de er nevnt i delkapittelet over. GenOpt, DAKOTA, MATLAB er noen av disse verktøyene som er blitt brukt til optimalisering og mange andre er også under utvikling. Fordelen med disse verktøyene er at de kan kobles med det tilgjengelige

simuleringsverktøyet brukeren ønsker. Problemet med disse verktøyene er deres avanserte brukergrensesnitt, noe som er for viderekomne brukere. I denne forskningen vil fokuset være på GenOpt som optimaliseringsverktøy. Dette er siden GenOpt er et nytt tillegg i IDA ICE og er veldig brukervennlig for selv uerfarne brukere.

### 2.4.1 GenOpt

GenOpt er et generisk optimaliseringsverktøy som er utviklet for simuleringsoptimalisering [23]. Den er utformet for å definere verdiene til designparametere bestemt av brukeren til å minimere en såkalt objektiv funksjon, som kan være årlig energibruk, topp elektrisk behov eller forventet andel av ubehag (PPD verdi), som optimaliserer driften av et gitt system. Objektiv funksjonen beregnes ved hjelp av et eksternt simuleringsprogram, som IDA ICE, EnergyPlus, TRNSYS osv. For optimalisering bruker GenOpt ulike algoritmer. Disse algoritmene har forskjellige bruksområder avhengig av problemstillingen og begrensninger tilknyttet til den. Liste over forskjellige algoritmer brukt i GenOpt er som følge:

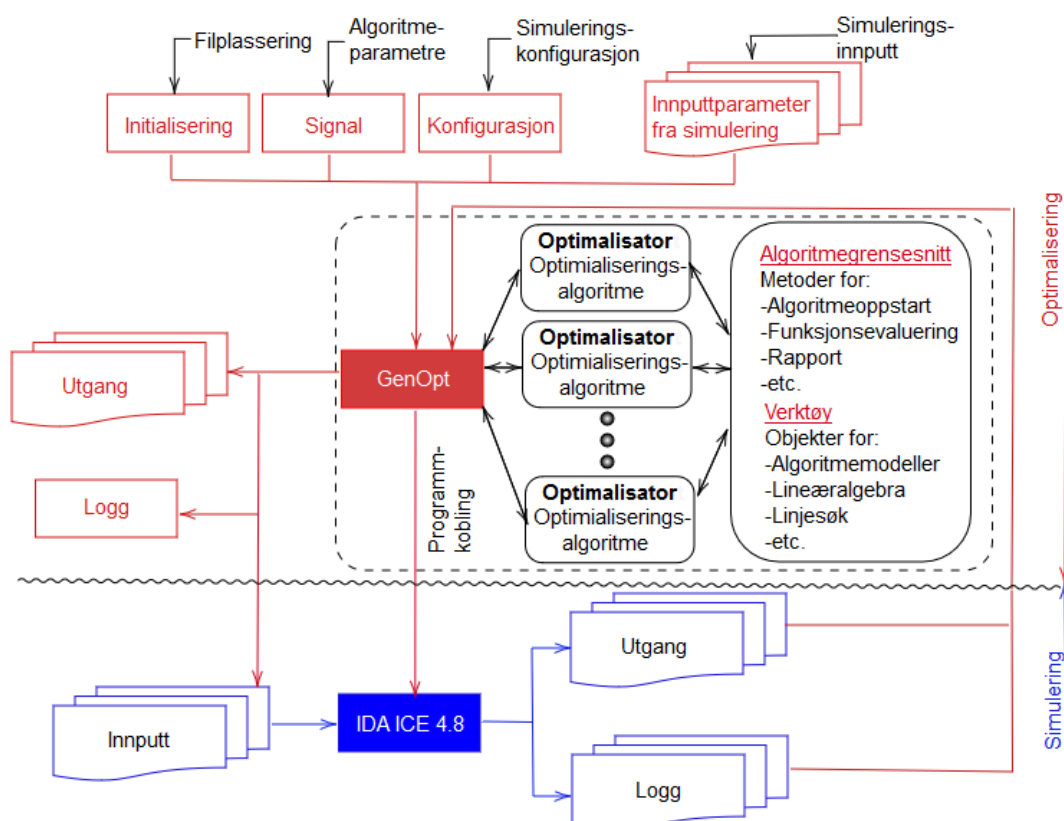
- Generalized Pattern Search algoritmer (Hooke-Jeeves og Coordinate Search Algorithm), som kan kjøres med mange startpunkter.
- Particle Swarm Optimization algoritmer (for både kontinuerlig og diskontinuerlige uavhengige variabler).
- En hybrid algoritme som både bruker Particle Swarm Optimization og Hooke-Jeeves for lokal optimalisering.
- Nelder-Mead Simplex algoritme.
- Discrete Armijo Gradient algoritme.
- Golden Section og Fibonacci algoritme for endimensjonal minimering.

Noen av disse er tids- og ressurskrevende algoritmer og bruker andre matematiske modeller mens andre er mindre ressurskrevende og konverger mye raskere.

## 2.5 IDA ICE og GenOpt samspill

I denne forskningen, er simuleringsverktøyet IDA ICE koblet sammen med optimaliserings tilleggspakke GenOpt v3.1. Som illustrert i Figur 2, krever GenOpt kernel (kjernen) visse inngangsfiler (mal-fil, oppstartfil, signalfil, konfigurasjonsfil, fun.java-fil) [23]. Disse filene må forberedes i en viss rekkefølge og form slik at den kan pass inn i det eksterne simuleringsprogrammet. Det er jo dette programmet som håndterer beregningen av den

objektivfunksjonen. Hver eneste innputt fil har ansvaret for et visst området og arbeid. For eksempel, inngangsfilen til simuleringen, er hovedfilen hvor alle mulige uavhengige variabler, samt deres plassering er merket med spesialtegn. Oppstartfilen inneholder informasjon om spesifikke plasseringen av relaterte filer (som innputtfil, konfigurasjonsfil, resultatfil, klimadatafil og den filen som tilhører den objektive funksjonen). Signalfilen er ansvarlig for innstillinger for optimaliseringsalgoritmen og dens spesifikasjoner. Konfigurasjonsfilen er den filen hvor alle opptattsignaler og mulige feilmeldinger som kan dukke opp under simuleringen, er lagret.



Figur 2: Samhandlingen mellom IDA ICE og GenOpt.

Algoritmegrensesnittet til GenOpt er som vist figuren over (bokser med svart omriss). Det er enkelt å legge inn egne optimaliseringsalgoritmer i GenOpt. Dette gjøres ved å utvide optimalisatoren (midt i omrissede området). Optimalisatoren gir tilgang til kjernen i GenOpt og er grensesnittet mellom kjernen og optimaliseringsalgoritmen. Den muliggjør å innhente nødvendige innstillinger for den brukte algoritmen, innledende verdier for uavhengige variabler som er benyttet og deres grenseområder. Grensesnittet vil også tilby tilgang til andre metoder som det å vurdere en simulering med det aktuelle oppsettet av uavhengige variabler eller å lage simuleringsrapport av optimaliseringsrunden osv.

Under den selvkjørende optimaliseringsprosessen som foretar flere gjentakende simuleringer, henter GenOpt tekstfilen fra IDA ICE, tilordner inngangsverdier til variabler som er forhåndsdefinert i signalfilen og lage en inputtfil som mates inn i IDA ICE. Deretter sender GenOpt simuleringssignal til IDA ICE og objektivfunksjonen simuleres og beregnes med en syklus. Når simuleringen er ferdig, vil GenOpt avlese data fra resultatfallene (CSV, HTML, ESO osv.) for så å lage en ny inputtfil. På dette tidspunktet er det den forhåndsbestemte optimaliseringsalgoritmen, fra biblioteket i GenOpt, som står for tildeling av nytt sett av variabler til inputtfilen. Optimaliseringsprosessen vil kjøres om igjen, gjennom et visst antall av simuleringsgenerasjoner, til objektivfunksjonen konvergerer. I denne studien, en Particle Swarm Optimalisering algoritme (PSO) er valgt fra GenOpt bibliotek. Dette fordi optimaliseringsproblemstillingen har kun med diskontinuerlige parametere å gjøre, samtidig bruker PSO mindre tid og ressurser på å konvergere.

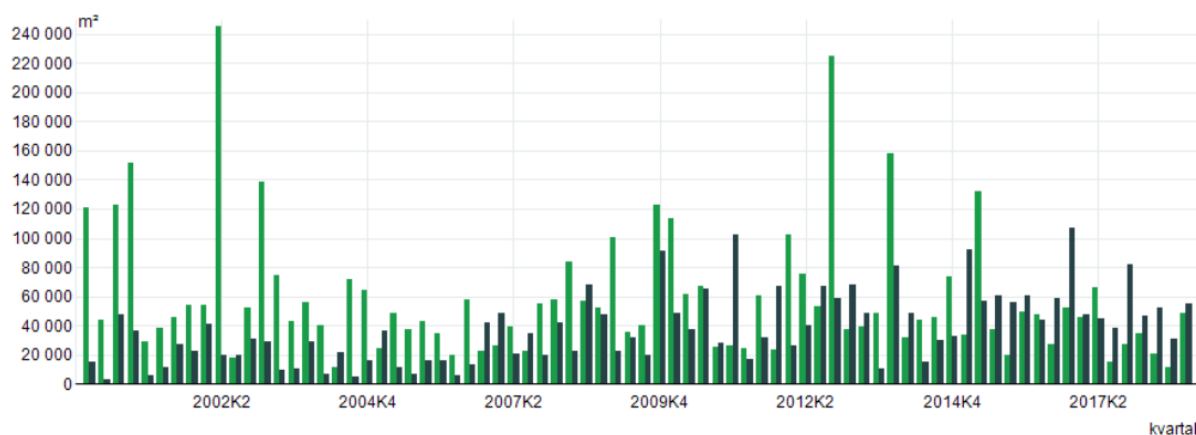
## 3 Metode

### 3.1 Referansebygg

Renoveringsprosjekter finnes det veldig mange eksempler på i Norge, da det er mange bygg som er bygget med veldig gamle krav og energimessig har alle stor forbedringspotensial. I dette kapitlet skal det ses på hva som har vært krav til bygg og hva som definerer et generelt bygg med disse kriteriene implementert. Referansebygget som modelleres, ut i fra beskrivelse av typisk kontorbygg, skal brukes til å simulere og optimalisere mot passivhusstandarden.

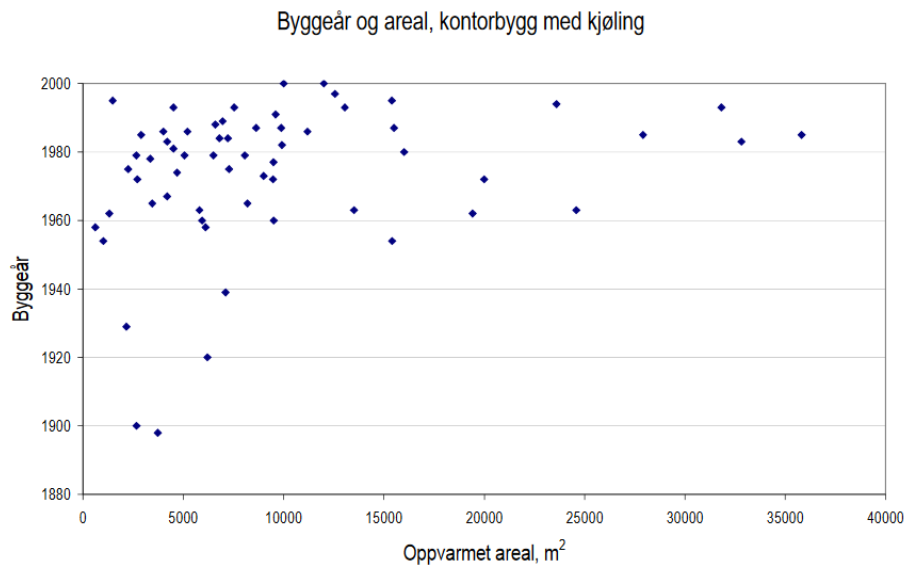
#### 3.1.1 Utforming og arealer

Offentlig og privat tjenesteyting står i dag for største andelen av kontorbygg, med resterende andel under annet kontorbygg (industri, bygg og anlegg osv.) [24]. For å innhente statistisk data for kontorbygg, brukes Statistisk sentralbyrå som kilde. Figur 3 viser en oversikt av bruksareal i ferdigstilte bygg innenfor kontor og administrasjons kategorien.



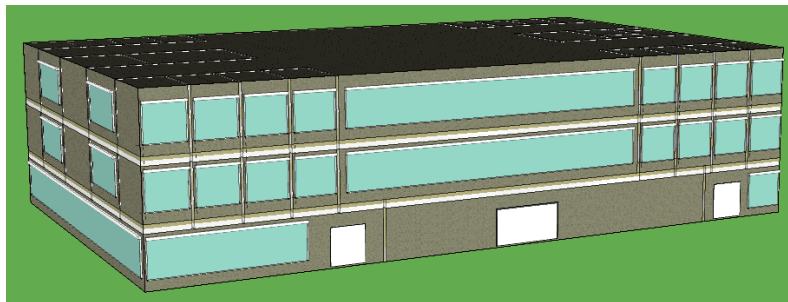
Figur 3: Statistisk oversikt over oppførte bygninger fra 2000 til 2018 [25].

Som det kan leses av Figur 3 kan et kontorbygg ha så stort bruksareal som nødvendig, men fleste parten ligger under 30 000 m<sup>2</sup>. Men dette representere ikke et gjennomsnitt i seg selv og typisk kontorbygg kan ligge helt ned i 200 m<sup>2</sup> i areal. Figur 4 viser sammenheng mellom byggeår og arealer i et kontorbygg.



Figur 4: Sammenheng mellom bruksareal og byggeår [26].

Ut fra Figur 4 og statistikk fra andre steder, er det lurt å gå for et bygg på ca. 8000 m<sup>2</sup> og som er bygd rundt ca. 1980 tallet. Men siden dette bygget blir en stor utfordring for IDA ICE og GenOpt, med de tilgjengelige ressursene av datakraft, nedjusteres arealet på bygget ned til 3000 m<sup>2</sup>. Bygget har en rektangulær utforming da det er veldig typisk norsk kontorbygg. Bygget fordeler seg over 3 etasjer og hvor hver etasje på ca. 1000 m<sup>2</sup>. lengden på bygger er 40 m og bredden er på 25 m.



Figur 5: IDA ICE modellen av bygget i 3D.

Figur 5 viser oppbyggingen av referansebygget. Som nevnt over, er har bygget en kompakt firkantet utforming og bygget kropp har nok med vinduer i riktig arbeidshøyde som vil sikre gode dagslysforhold. TEK10 har et makskrav på forholdet mellom U-verdi, vindusareal og bruksareal som er som følge:

$$\frac{U - verdi_{vindu} \cdot Vindusareal}{Bruksareal (BRA)} \leq 0,20 \quad (5)$$

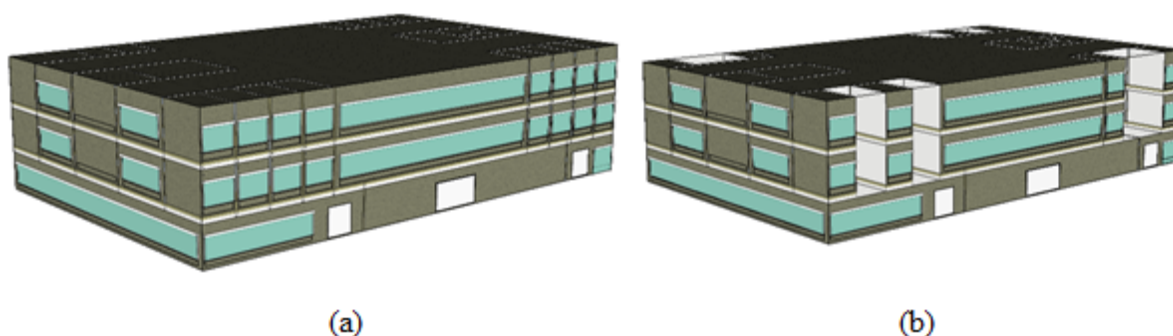
Dette betyr at det er direkte sammenheng mellom U-verdien til vinduene og BRA. Jo større vindusareal bygget har desto bedre u-verdi skal vinduene ha. Av den grunn er det valgt å ha 1,5 m i vindushøyde og en u-verdi på 1,6, noe som er minstekravet for energi beregninger. Dette gir bygget et vindusareal på totalt 331 m<sup>2</sup> og et vindu-BRA forhold på 0,18.

### 3.1.2 Forenklingen av modellen

For å gjøre energisimuleringene enda mindre tidskrevende, er det benyttet av noe som heter «Zone Multiplier» i IDA ICE. Det denne funksjonen gjør, er at den velger å gange opp de sonene som er både fysiske og er utsatt for nesten like påkjenninger, slik at beregningstiden reduseres. Resultatene av en slik forenkling er ganske lik en helhetlig modell med alle de sonene implementert [27]. En validering av modellen er gjort for å se at dette er til å stole på. Forenklingen er som følge:

- Sonene «Celle nord 04» og «Celle nord 05» er like da de er på samme fasade, dermed fjernes en av dem og den gjenværende sone ganges opp med 2. Det samme gjelder for «Celle sør 04» og «Celle sør 05».
- Sonene «Celle nord 02», «Celle nord 03», «Celle nord 06» og «Celle nord 07» er like da de er på samme fasade, dermed fjernes 3 av dem og den gjenværende sone ganges opp med 4. Det samme gjelder for «Celle sør 04», «Celle sør 05», «Celle sør 06» og «Celle sør 07».

Figur 6 viser hele modellen sammenlignet med den forenklete modellen.



Figur 6: (a) referansebygget i sin helhet, (b) forenklet referansebygg.

Etter å ha kjørt simulering av begge modellene, er resultatene slik som vist i Figur 7. Total levert energi til bygget er 122,7 [kWh/m<sup>2</sup>] for hele bygget mot 122,6 [kWh/m<sup>2</sup>] for forenklet bygningsmodell. Det er en differanse på 0,1 [kWh/m<sup>2</sup>]. Her kan man se at forskjellen er ca.



0,081%, altså ca. 99,91 like. Det har veldig lite å si under simulering av en stor modell. Det er verdt å merk at disse resultatene ikke gjenspeiler det endelige resultatet av referansebygget, og er kun ment som validering av forenklingen foretatt. Heretter brukes den forenklete soneinndelingen til videre bruk i simuleringer.

Delivered Energy				Delivered Energy			
Meter	Total, kWh	Per m2, kWh/m <sup>2</sup>	Peak demand, kW	Meter	Total, kWh	Per m2, kWh/m <sup>2</sup>	Peak demand, kW
■ Lighting, facility	70266.1	23.9	23.34	■ Lighting, facility	70263.1	23.9	23.34
■ Electric cooling	15172.2	5.16	0.002...	■ Electric cooling	15178.5	5.163	0.002...
■ HVAC aux	66208.0	22.52	13.85	■ HVAC aux	66207.0	22.52	13.85
■ District heating	13531...	46.02	71.29	■ District heating	13504...	45.93	71.36
■ Equipment, te...	73865.1	25.12	24.53	■ Equipment, te...	73861.7	25.12	24.53
■ CHP production	0.0	0.0	0.0	■ CHP production	0.0	0.0	0.0
<b>Total</b>	<b>36082...</b>	<b>122.7</b>	<b>133.0</b>	<b>Total</b>	<b>36055...</b>	<b>122.6</b>	<b>133.1</b>

Figur 7: Sammenligning av resultater fra referansebygget (venstre) og forenklet referansebygg (høyre).

### 3.2 Inndeling av soner i referansebygget

Soneinndelingen av hver etasje er gjort med hensyn til realistiske scenarier av mulige løsninger i kontorlokale. Arealøsning i hver etasje er det valgt å gå for kontorlandskap, som er i økende form, samt cellekontorer spredd rundt i hjørnene av etasjene. Åpent kontorlandskap løsningen er ment til både arbeidsområder og kjøkken- og felles lunsjsone. Første etasjen har resepsjon med egen inngang og tilgang til heis og trapper. Det er også parkeringshus i samme etasjen sammen med en avsatt del for forretningslokaler. Hver av disse har egne innganger. Andre og tredje etasjen har lik inndeling og består av:

- 16 cellekontorer, 4 i hvert hjørne
- Åpent kontorlandskap området
- Et lite møterom
- Et større møterom/konferanserom
- WC / HC rom
- Garderobe
- Heissjakt
- Teknisksjakt

Alle etasjene er konstruert med 3.4 m i mellom hver etasje. Vedlegg D viser planløsningen over alle etasjene.

### **3.2.1 Varmesystem i energisentralen**

Da dette referansebygget skal modelleres som om det er bygd rundt 1980 tallet, velges det å ha fjernvarme som et av alternativene til oppvarming. For oppvarmingskilde på romnivå velges det å ha vannbårent radiatorsystem. Disse monteres under alle vinduer slik at de kan fjerne faren av kaldras.

### **3.2.2 Solavskjerming**

Solavskjermingssystemet i denne oppgaven er utvendig screen. Bygget antas å ha installert nytt solskjermingssystem rund 2000 tallet, men det var kun med manuell styring. Siden bygget skal renoveres mot passivhus, er det vurdert å legge inn nytt solavskjermingssystem som er helautomatisert og styres av solinnstråling.

### **3.2.3 Oppsummering av referansebygget**

Referansebygget er bygd, som kontorbygg, i 1980 og har vært i drift fram til 2019. Bygget har en rektangulær utforming og dets totale areal er på 3000 m<sup>2</sup> og er fordelt over 3 etasjer, med fortetning, adkomst- og forretningslokaler i 1. etasjen. Plassering til bygget skal være Oslo og tilkoblet fjernvarmeanlegget i Oslo. Modellen til referansebygget skal kunne tilfredsstillte TEK10 krav (2010) og målet er å utbedre bygget energimessig.

## **3.3 Simuleringsverktøy**

IDA ICE er blitt valgt som simuleringsverktøyet, da dette programmet er blitt mere anvendt i den Norske rådgivning- og forskningsbransjen. En av de viktigste årsakene til valg av IDA ICE er at dets nøyaktighet som et simuleringsverktøy. Det har et veldig brukervennlig grensesnitt. Programmet har bratt læringskurve, men det følger med gode brukermanualer og stegvis veiviser. Av optimaliseringsverktøy er Generic Optimization (GenOpt) benyttet.

## **3.4 Inndata**

### **3.4.1 Konstruksjon**

Siden bygget skal tilfredsstillte TEK10 (2010) krav for energi, skal den følge minste verdier for energiberegninger som er å finne under kapittel §14-4 i TEK10. Da skal verdier vist i Tabell 3

bli tatt hensyn til under videre oppbygging av modellen. SFP-verdien, årsgjennomsnitt temperaturvirkningsgrad og normalisert kuldebroverdien er innhentet fra energitiltakskrav i §14-3.

Tabell 3: Inndata verdier til konstruksjonen i IDA ICE modellen.

Type	Verdi (referansebygg)
U-verdi yttervegg	0,22 [W/m <sup>2</sup> K]
U-verdi tak	0,18 [W/m <sup>2</sup> K]
U-verdi gulv	0,18 [W/m <sup>2</sup> K]
U-verdi vindu	1,60 [W/m <sup>2</sup> K]
Etasjeskiller	0,17
Interne vegger	0,62
Normalisert kuldebroverdi, $\Psi$	0,06 [W/m <sup>2</sup> K]
Infiltrasjon ved 50 Pa, $n_{50}$	3 h <sup>-1</sup>
SFP-faktor ventilasjonsvifter	2,50 [kW/m <sup>3</sup> /s]
Virkningsgrad av gjenvinner	70%

Det tabellen sier er at yttervegger skal ha en maksverdi varmetap via vegg. Denne verdien er et kombinert resultat av lagsammensettingen i vegg, altså veggkonstruksjonen. For tak er konstruksjonen litt annerledes men også den skal ikke overstige den u-verdien oppgitt i tabellen over. Samme beregningsmetode kan benyttes til beregning av u-verdi for tak og gulv, men kun med et homogent felt. Veggkonstruksjonen følger byggforsk rapport 471.401 og takkonstruksjonen byggforsk rapport 471.013.

I IDA ICE infiltrasjonen defineres på flere måter. Det er valgt å bruke ACH, som står for antall luftskiftninger per time og verdien fra tabellen over er benyttet. Infiltrasjon skal fordeles på utvendig overflateareal, dermed er «External Surface Area» er huket av under tilvalgs meny. Kuldebroverdien «Overall Internal» er valgt, det vil si kuldebro lengden innenfor skallet på bygget benyttes, som er i henhold til Norsk beregningsmåte. SFP verdien er summen av effekt fra avtrekk- og tilluftsviften. Da må den SFP verdien fordeles over begge viftene. Virkningsgraden til aggregatet er satt til den verdier fra tabellen over. For vindprofil brukes det «Suburban (ASHRAE 1993)» som tilsier at bygger utsatt for mer vind enn sentrum i byen. Det

må også nevnes at interne vegger som er standard. Etasjeskilleren i bygget er i henhold til betongelementboka [28]. Data for disse elementene er vist i tabellen over.

### 3.4.2 Klima og plassering av referansebygget

Alle beregninger og simuleringer i denne oppgaven er gjort med plassering av referansebygget i Oslo/Fornebu, Stavanger/Sola og Tromsø. Av værdata er det brukt Oslo/Gardermoen, Stavanger/Sola og Tromsø/Langnes klimadata for dette bygget siden det er den nærmeste plassering en kan finne i IDA ICE.

For plassering av disse byene er det kun mulig å bruke IWEC, mens til klimadefinisjonen er det mulig å bruke IWEC 2. Tabell 1 viser månedlig oversikt over gjennomsnittlige tørrkuletemperaturer i alle disse tre byene. Dette er data innhentet fra IWEC 2 filene i IDA ICE.

### 3.4.3 Solavskjerming

Blir i IDA ICE er av type Screen med styringskontroll basert på sol. Her har IDA ICE standard styringskontroll som aktiveres når solinnstrålingsnivået når  $100 \text{ W/m}^2$ .

### 3.4.4 Settpunktverdier for soner

Verdiene fra Tabell 4 er satt inn som settpunktverdier. Tabellen viser verdier både for primær- og sekundær soner.

Tabell 4: Inndata til settpunkter i sonen(e).

Type	Sone
Temperatur (°C)	21 – 24
CO <sub>2</sub> konsentrasjon (ppm)	700 – 1100
Relativ fuktighet	20 – 80%
Trykkdifferanse (Pa)	-20 – 10

Arbeidstilsynets veiledning 444 anbefaler å bruke anbefaler å bruke oppvarmingssettpunkt under  $22^\circ\text{C}$ , samtidig som NS 3031 anbefaler å ha  $19^\circ\text{C}$  utenfor driftstid og  $21^\circ\text{C}$  i driftstiden. Temperaturstyringen vil virke slik at når temperaturen i sone synker under  $21^\circ\text{C}$  vil oppvarming slå seg på og når den stiger over  $24^\circ\text{C}$  så vil kjølingen aktiveres.

### 3.4.5 Internlaster

Verdier for internlaster er hentet fra NS 3031 for referansebygget. For optimalisering av må referansebygget få nye verdier for internlaster da bygget skal forholde seg til ny standard. Da brukes verdier for energiberegning fra passivhusstandarden NS 3701. Dette er anbefalte verdier som skal benyttes for energisimulering av bygg. Data innhentet fra begge standardene er vist i Tabell 5.

Tabell 5: Internlaster brukt i referansemodellen.

Type	Verdi (NS 3031) [W/m <sup>2</sup> ]	Verdi (NS 3701) [W/m <sup>2</sup> ]
Personer	4,0	4,0
Utstyr	11	6,0
Belysning	8	4,0

Disse verdiene er satt i alle soner etter sonetype. Det betyr at primærsoner har alle disse parameterne mens sekundær soner, som ikke ment for varig opphold, kun har belysning.

MET verdien, som definerer aktivitetsnivået til person i sonen ut i fra metabolismen, er satt til 1,0. Det betyr at personen er i har sittende aktivitet. Dette er normalt aktivitetsnivå på kontorplasser [29]. Bekledningen brukes i beregning av PPD og PMV til personer i sone. Verdien for bekledding til personer er satt til 0.85, som er grenseverdien for personer med lette forretningsklær. Måten IDA ICE definerer varmelasten generert fra personer er slik at programmet finner antall personer i sonen, summerer dem opp, ganger det med MET verdien. Dette blir da avgitt som varme til sone.

For å definere antall personer i oppholdssonen skal internlastverdien fra NS 3031 for energiberegning legges til grunn. Da har vi følgende data:

- Varmeavgivelsen fra personer er satt til 4 W/m<sup>2</sup> for energiberegninger
- Varmeavgivelsen fra en person som er 108 W/person [18]
- Totalt primærrom er på 2230 m<sup>2</sup>

Fremgangsmåten er slik:

$$\frac{2230 \text{ m}^2 \cdot 4 \text{ W/m}^2}{84 \text{ W/person}} \approx 106 \text{ personer} \quad (6)$$

Dette tilsvare ca. 21 m<sup>2</sup>/pers. det er da langt større en kravet for personbelastning stilt i NS 3031 som er på 5 m<sup>2</sup>. Da velges det å gå for 15 m<sup>2</sup>/pers som TEK10 krever for kontorer. Med dette får vi:

$$\frac{1 \text{ pers}}{15 \text{ m}^2} \approx 0,0667 \text{ personer/m}^2 \quad (7)$$

Denne antagelsen tas siden meningen med åpent kontorlandskap er å ha bedre arealutnyttelse, og 21 m<sup>2</sup>/pers er uvirkelig i realiteten.

### 3.4.6 Driftstider og tilstedeværelse

Driftstider til bygget er definert som i Tabell 6 (NS 3031).

Tabell 6: Driftstider til bygget

Driftstid	(Timer/døgn/uker)
Ventilasjon	12/5/52
Personer	12/5/52
Oppvarming/utstyr/belysning	12/5/52

Bygget er konstruert slik at det følger arealkravet i NS 3031 som sier at arealandelen til primærrrom skal være på minst 65% og maksimum 35% for sekundærrrom. Samtidig skal tilstedeværelse være på minimum 60% i primærarealet. Grafene for belysning, utstyr og personbelastning finnes i vedlegg A.

### 3.4.7 Ventilasjon

Luftmengder benyttet til referansebygget er basert på minimumluftmengder angitt i TEK10. For ventilasjon utenfor driftstid, er det kun minste luftmengdeverdi og i driftstiden er det summen av ventilasjon for materialer og ventilasjon for personer som skal ventileres for. I TEK10 kreves det at et kontorbygg skal minst 0,7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h med luft utenfor driftstid, 2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h for materialer og 26 m<sup>3</sup>/h/pers for personer. Det vil henholdsvis gir 0,2 l/m<sup>2</sup>s utenfor driftstid, 0,7 l/m<sup>2</sup>s for materialer og for personer. Men dette er minimumsverdier.

For referansebygget er luftmengder vist i

Tabell 7 benyttet, ettersom disse verdiene tilfredsstiller temperatur-, PPD- og energikravet kravet som skal benyttes til optimaliseringen.

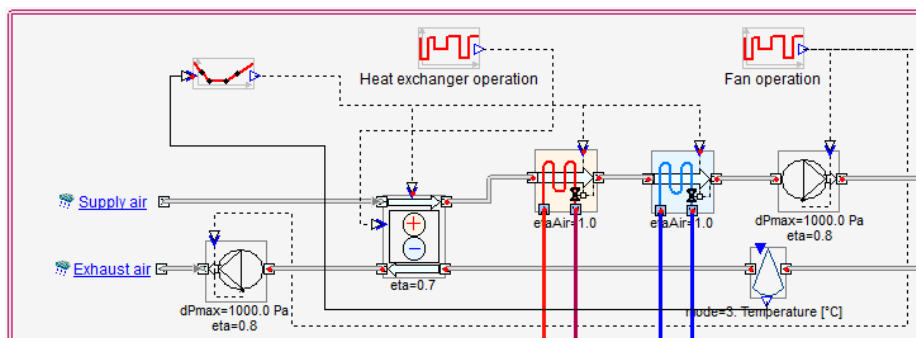
Tabell 7: Luftmengder anvendt i referansebygget.

Sone	Luftmengder (utenfor driftstid)	Kjølesesong (i/utenfor driftstid)
Primærrom [ $l/m^2s$ ]	2,3 (0,2)	4,0 (0,2)
Sekundærrom [ $l/m^2s$ ]	0,7 (0,2)	0,7 (0,2)

Ventilasjonsstrategien for referansebygget er CAV. Her vil konstante luftmengder, som er uavhengig av endringer på sonenivå, tilføres sonen. For å kontroll på luftmengder tilført i primær- og sekundærrom og samtidig kreve forskjellige verdier av luftmengder i og utenfor driftstid og ikke minst, ekstra luft for kjølesesongen, må man bruke tidsplan skjema eller «Schedule». Dette gir modellen en fleksibel måte å styre luftmengde til enhver tid, spesielt nå man bruker CAV system. Måten en gjør det på er som følge:

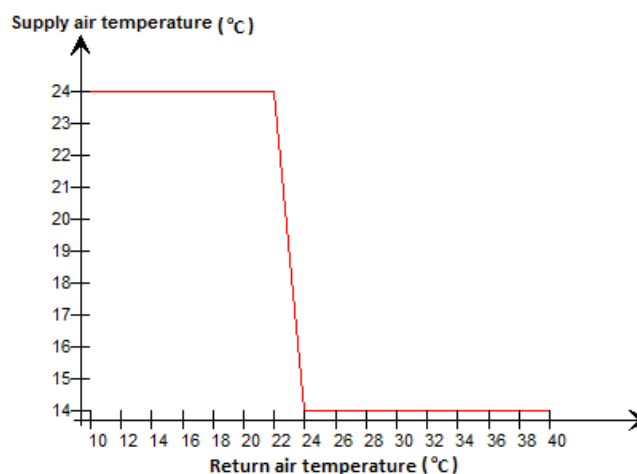
- Endre ventilasjonssystemet til egendefinert og gå inn i makroen
- Legge til egendefinert tidsskjema og koble den til viften
- Gå i settpunkter for sonen og endre maks. og min. luftmengder til henholdsvis 0 og 1. Det er nemlig slik at disse tallene ganges med tall i fra tidsskjemaet og dette kreves fra aggregatet
- Definer et slik tidsskjema for både primær- og sekundærsonen og implementer det i de aktuelle sonene

Ventilasjonsaggregatet er et balansert, avtrekkskompensert system (Supply Temperature Function of Return), det vil si at, tilluftstemperaturen er basert på temperatur målt i avtrekket fra sonene. Det fungerer på den måten at, jo kaldere avtrekkstemperaturen er, desto varmere luft tilføres rommet, og vis versa. Aggregatet benytter seg av et plott for temperaturer slik at den følger en predefinert tidskurve, for oppvarming eller kjøling. Oppsettet til ventilasjonsaggregatet er vist i Figur 8.



Figur 8: Ventilasjonsaggregat i IDA ICE.

Temperaturgrafene til aggregatet er vist i figuren under, der x-aksen er temperaturverdier målt i avtrekket og y-aksen er tilluftstemperaturen.



Figur 9: Temperaturkurve, ventilasjonsaggregat.

Ventilasjonsaggregatet er ikke skrudd av i helgene og helligdager, men går på minimumsverdier som er 0,2 l/m<sup>2</sup>.s. SFP verdien, som nevnt tidligere, er satt til 2,5 kW/m<sup>3</sup>/s og gjenvinningsgraden er satt til 70%.

### 3.4.8 Oppvarming- og kjølesystem

Alle soner i referansebygget er utstyrt med ideelt varme- og kjøleapparat i utgangspunktet. Det dette apparatet gjør er å tilføre stor nok varme- og kjøleeffekt til å opprettholde settpunkttemperaturer til sonen. Men, for at bygget skal være et reelt studieobjekt, velges det å installere vannbaserte radiatorer i primærsonene. For å dimensjonere effektstørrelsen til hver og enkel radiator, må en «Heating Load» simulering foretas, med ventilasjon avslått under simuleringen. Det denne simuleringen gjør, er å varme opp sonen med ideelt varmeapparat på de verste dagene i året. Resultatet av denne simulering, vil vise hva de forskjellige rommene



krever av oppvarmingseffekt. Deretter må alle vannbaserte radiatorene sette inn i hver sone med riktig effekt. Det er viktig å husk at radiatorene må monteres under hvert vindu og samtidig dekke hele vindusbredden.

Oppvarmingssystemet i sentralen er dog ikke en sentral del av denne oppgaven. Av den grunn er et vanlig ESBO-anlegg fra IDA ICE satt inn. Bygget er som nevnt, tilknyttet kommunalt fjernvarmeanlegg. Derfor må dette legges inn undre valgene i ESBO-anlegge. Dette gjøres ved å endre oppvarmingsalternativet under ESBO til «District Heating».

Virkningsgraden til fjernvarme skal i utgangspunktet settes til 0,88 (radiator sammen med fjernvarme), i henhold til NS 3031.

### **3.5 Optimaliseringsprosess**

Hovedpoenget med denne oppgaven er jo å optimalisere bygget, gjennom scenario 1 og scenario 2, for å finne den mest kosteffektive løsningen. For å kunne gjøre et slikt forsøk, må det lages en oversikt over de kritiske variable parametere en optimaliseringsprosess skal teste. Disse variable parametere som tidligere nevnt må ha en variasjonsområdet som i dette tilfelle er minimumskravene som er stilt i TEK10 og passivhusstandarden. Det vil si u-verdier og andre kritiske parametere.

Til optimaliseringsprosessen er det tenk to scenarier. Delkapitlene under omhandler disse scenariene.

#### **3.5.1.1 Scenario 1**

I scenario 1 skal det ses på hvordan endring i fysiske parametere vil kunne endre ytelsen til bygget, slik at vi ikke nødvendigvis trenger å rive ned bygget og bygge opp med passivhus krav. Det vil si at vi bruker kjøle- og oppvarmingsbehovet utgitt i NS3701 som mål/begrensning og prøver å endre på parametere for å se om det er mulig å tilfredsstille disse kravene med bare å forbedre noen av dem og ikke alle på en gang.

#### **3.5.1.2 Scenario 2**

Dette scenarioet velger å bygge på scenario 1. Det betyr at det fortsatt strebes med å nå kravene i NS 3701 med å endre på fysiske parametere, samtidig som oppvarmingssystemet i bygget som er radiatorer fjernes og oppvarming via tilluft benyttes. Altså ventilasjons anlegget skal byttes fra CAV til VAV, hvor ventilasjonen på egenhånd skal stå for både oppvarming og kjøling av

bygget. Her vil det forsøkes å finne ut hvilke tilluftstemperaturer som er optimale med tanke på komfort og energikravene stilt i scenario 1.

### 3.5.1.2.1 Ventilasjonsstrategi for scenario 2 (DCV)

I dette scenarioet brukes DCV som til luftmengdestyring. Her blir et VAV-system som styres etter CO<sub>2</sub> og temperatur benyttet. Videre er DCV systemet i scenario 2 et kombinert system bestående av DCV for primærsonen og CAV for sekundærsonen. Ved å ha et slikt system, er det mulig å definere forskjellige minimum- og maksverdier for primær- og sekundærsonen. CAV-soner har like verdier som definert i scenario 1 med samme tidsskjema. DCV-soner har 0,2 l/m<sup>2</sup>s som minimum og 4 l/m<sup>2</sup>s som maksimum tilluftsmengder.

Virkningsgraden til fjernvarme skal i utgangspunktet settes til 0,84 (ventilasjonsbatteri sammen med ventilasjon), i henhold til NS 3031.

## 3.5.2 Inndata for optimalisering

Når referansebygget er ferdigdefinert med TEK10 data og simulert for å se om det tilfredsstillende kravene, må alle elementene som er innenfor variasjonsområdet for hver parameter legges inn i biblioteket til IDA ICE. Det vil si forskjellige vegg-, tak-, gulvkonstruksjoner, vindustyper har nødvendige u-verdier og egenskapene til hver parameter. I tillegg må variasjonsområde for ventilasjonstemperaturer og luftmengder og deres minimum og maksimumsverdier, vurderes. Ett oversikt over disse parameterne og deres variasjonsområde er illustrert i Tabell 8. For vegg-, gulv- og takkonstruksjonen er det tenkt forskjellige strategier for renoveringen, slik at dette kan gi programmet muligheten til å endre parameterne og etterligne en realistisk renoveringsprosess. Her vil kun isolasjonstykkelsen endres, basert på datatabeller fra byggforsk [30] [31] [32]. For vinduer er u-verdiene med utgangspunkt i dokumenter fra vindusleverandøren Pilkington (Glassakta) [33].

Tabell 8: Optimaliseringsparametere (u-verdi) og tilhørende variasjonsområdet.

Konstruksjonstype	Variasjonsområdet (U-verdi) [W/m <sup>2</sup> K]
Yttervegg	0,22 0,2 0,17 0,15 0,13 0,12
Tak	0,18 0,16 0,13 0,1 0,08
Gulv på grunn	0,18 0,16 0,13 0,1 0,08
Vindu	1,60 1,40 1,2 1,0 0,8

Solavskjermingen skal kun ha forskjellige g-verdi. Til det er det å bruke Sunworker M654, M391, M393 som variasjonselement. Dette er henholdsvis fargene grå, svart og bronse, som levers av Dickson [34]. Data for dette finnes i vedleggene E.1E.2E.3.

I scenario 2, vil det også ses på optimalisering av tilluftsmengder. Dette er essensielt i det scenarioet da det kun blir brukt ventilasjonsluft til oppvarming og kjøling av bygget. Minimumsluftmengder i og utenfor driftstid blir uberørt, mens ventilasjonsluften i driftstiden som er DCV styrt, vil optimaliseres med verdier vist i Tabell 9.

Tabell 9: Optimaliseringssettpunkter (temperatur) og tilhørende variasjonsområdet.

Type	Verdier
Tilluftsmengder	2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 [l/s]
Tilluftstemperatur ved 10°C avtrekkstemp.	23,0 24,0 25,0 26,0 [°C]
Tilluftstemperatur ved 22°C avtrekkstemp.	23,0 24,0 25,0 26,0 [°C]
Tilluftstemperatur ved 24°C avtrekkstemp.	14,0 15,0 16,0 [°C]
Tilluftstemperatur ved 40°C avtrekkstemp.	14,0 15,0 16,0 [°C]

I et avtrekkskompensert aggregat som er benyttet både til oppvarming og kjøling av bygg, er det viktig å passe på at store luftmengder trenger mindre ekstreme temperaturer til både kjøling og oppvarming og omvendt. Her er det verdt å nevne at det ikke anbefales å bruke temperaturer lavere en 14°C til ventilasjon da det er fare for kondens på kanaler og innvendige overflater i bygget, avhengig av fuktproduksjonen i sonen.

For simuleringer gjort under optimalisering av referansebygget må noen av verdier som ikke endres av optimaliseringsprogrammet GenOpt, bli endret manuelt på forhånd før optimalisering settes i gang. Disse verdiene er igjen å finne i tabellen under.

Tabell 10: Verdier som bør endres før optimalisering.

Type	Verdi (for klargjøring før optimalisering)
Normalisert kuldebroverdi, $\Psi$	0,07 [W/m <sup>2</sup> K]
Infiltrasjon ved 50 Pa, $n_{50}$	0,6 h <sup>-1</sup>
SFP-faktor ventilasjonsvifter	1,50 [kW/m <sup>3</sup> /s]
Virkningsgrad av gjenvinner	85%

### 3.5.3 LCC algoritmen

Renoveringsprosessen av referansemодellen er sett på som en enkeltobjektiv, flerdimensjonal optimalisering som kan defineres som følge [35]:

$$\text{Gitt at: } f: X \rightarrow \mathbb{R} \quad (f: \mathbb{Z}^{n_d} \rightarrow \mathbb{R}) \quad (8)$$

$$\text{Finn: } \min_{x \in X} f(x) \quad (9)$$

$$\text{Så lenge: } X \triangleq \{x \in \mathbb{Z}^{n_d} | x^i, i \in \{1, \dots, n_d\}\} \quad (10)$$

Hvor  $x \in X$  er definert som en vektor av uavhengige variabler,  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$  er den objektive funksjonen som skal minimeres og  $X \subset \mathbb{Z}^{n_d}$  er variasjonsområdet som skal gjeldende. Alle skallkomponenter som spesifisert som adskilte og uavhengige variabler som har en predefiner verdi gitt i  $\mathbb{Z}^{n_d}$ . Siden GenOpt opererer med enkeltobjektiv optimalisering, er løsningen minimumsverdien av  $f(x)$  innenfor området  $\mathbb{R}$ . For scenario 1, som kun er skallforbedring, er antall dimensjoner  $n_d = 5$ . For scenario 2, som ventilasjonsoppvarming og kjøling, er antall dimensjoner  $n_d = 10$  (da det også tas med flere punkter fra tilluftstemperaturkurven).

Parameterbegrensninger for scenario 1:

$$x^1 = \{YV_j, j \in \{0,12 \ 0,13 \ 0,15 \ 0,17 \ 0,2 \ 0,22\}\} \quad (11)$$

$$x^2 = \{Tak_k, k \in \{0,8 \ 0,13 \ 0,18\}\} \quad (12)$$

$$x^3 = \{Gulv_l, l \in \{0,8 \ 0,1 \ 0,13 \ 0,16 \ 0,18\}\} \quad (13)$$

$$x^4 = \{Vindu_m, m \in \{0,8 \ 1,0 \ 1,2 \ 1,4 \ 1,6\}\} \quad (14)$$

$$x^5 = \{Solavskjerming_n, n \in \{M654, M391, M393\}\} \quad (15)$$

Parameterbegrensninger for scenario 2:

$$x^1 = \{ YV_j, j \in \{0,12, 0,13, 0,15, 0,17, 0,2, 0,22\} \} \quad (16)$$

$$x^2 = \{ Tak_k, k \in \{0,8, 0,13, 0,18\} \} \quad (17)$$

$$x^3 = \{ Gulv_l, l \in \{0,8, 0,1, 0,13, 0,16, 0,18\} \} \quad (18)$$

$$x^4 = \{ Vindu_m, m \in \{0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6\} \} \quad (19)$$

$$x^5 = \{ Solavskjerming_n, n \in \{M654, M391, M393\} \} \quad (20)$$

$$x^6 = \{ Vent. luft_o, o \in \{2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5, 5,0\} \} \quad (21)$$

$$x^7 = \{ Vent. temp_p @ 10^\circ\text{C}, p \in \{23,0, 24,0, 25,0, 26,0\} \} \quad (22)$$

$$x^8 = \{ Vent. temp_q @ 22^\circ\text{C}, q \in \{23,0, 24,0, 25,0, 26,0\} \} \quad (23)$$

$$x^9 = \{ Vent. temp_r @ 24^\circ\text{C}, r \in \{14,0, 15,0, 16,0\} \} \quad (24)$$

$$x^{10} = \{ Vent. temp_s @ 40^\circ\text{C}, s \in \{14,0, 15,0, 16,0\} \} \quad (25)$$

Ligningen for den objektive funksjonen som skal optimaliseres via GenOpt er gitt som:

$$f(x) = IC_m + LCC_e + RC \quad (26)$$

Hvor  $IC_m$  er investeringskostnaden,  $LCC_e$  er energiforbruket i gjennom byggets levetid og  $RC$  er utskiftningskostnaden til diverse parametere.

Investeringskostnader  $IC_m$  for begge scenarier er materialkostnader som skal til, for å forbedre byggets ytelse. Det vil si, vinduer, vegger, tak, gulv, utskiftning varmegjenvinner, forbedre SFP verdien og kostnader knyttet til overgang fra CAV til DCV. Denne kostnaden er vist i vedlegg B [36].

$RC$ , utskiftningskostnaden er kostnaden knyttet til å bytte ut gamle vinduer og aggregat etter endt levetid.

Målet med optimaliseringen er reduksjon av energi til både oppvarming og kjøling, og finne den beste løsningen som ikke går på bekostning av beboernes tilfredshet. Den enkleste løsningen vil være å legge på mer isolasjon og bedre vinduer osv. for å forbedre isoleringsevnen til bygget. Imidlertid blir det store, unødvendige investeringer til forbedring av bygningskallet

uten å vite hvilke parametere som er mest kritiske og nødvendige, og hvilke av dem passer best sammen. Selv om forbedringen vil føre til mindre energiforbruk i bygningen, vil det komme til et punkt hvor utover det punktet, blir forbedringen av bygningsskallet, både fysisk og økonomisk, vanskelig og uhensiktsmessig å gjennomføre. Så når målet er å finne lønnsomheten til renoveringen av bygningen, må LCC av bygningen studeres. LCC er summen av nåverdien av investering og driftskostnader for bygget, inkludert vedlikeholdsutgifter og utskiftingskostnader, i løpet av bygningens spesifikke levetid.

Beregningsmetodikken, altså den matematiske modellen, er i henhold til forskningen gjort av Hasan, Ala [37]. Til denne forskningsoppgaven vil det ikke beregnes absoluttverdien av LCC, men forskjellen ( $dLCC_i$ ) mellom LCC for ethvert scenario ( $LCC_i$ ) og den for referansebygget ( $LCC_r$ ). Altså:

$$dLCC_i = LCC_i - LCC_r \quad (27)$$

Med denne metoden vil det kun bli sett på kostnader tilknyttet til endringen av bygningsparametere og ikke detaljert livsyklusberegning. Det antas også at vedlikeholdskostnader er konstante og dermed ikke en del av beregningen. Som ligning 26 viser vil kun kostnader tilknyttet til investeringen ( $LCC_i$ ), drift ( $LCC_e$ ) som er et produkt av energiforbruk og utskiftning ( $RC$ ) være med i beregningen.  $LCC_e$  er netto nåverdi av driftskostnader i løpet av bygningens levetid [37]. Dette beregnes slik:

$$LCC_e = ae_p E \quad (28)$$

$$a = \frac{1 - (a + r_e)^{-n}}{r_e} \quad (29)$$

$$r_e = \left( \frac{i - f}{1 + f} \right) - \frac{e}{1 + e} \quad (30)$$

Hvor:  $a$  er diskonteringsfaktoren for inflasjon og eskalering i energipriser (elektrisitet),  $e_p$  er energipris,  $E$  er simulert årlig energiforbruk for hele bygget,  $n$  er antall år i levetidsperioden til bygget,  $r_e$  er realrenten (inkludert effekten av eskalering av energipriser),  $i$  er nominellrenten,  $f$  er inflasjonen. Innputtverdier brukt til denne beregningen er oppsummert i Tabell 11. beregningen gir realrente ( $r_e$ ) = 0,039 og en diskonteringsfaktor ( $a$ ) = 23,22 for 60 års livssyklus.

Tabell 11: Innputtverdier brukt til beregning av diskonteringsfaktoren.

Variabler i LCC modellen	Utrykk	Verdi	Enhet
Levetid	$n$	60	år
Inflasjon	$f$	2	%
Eskaleringsratet	$e$	1	%
Energipris (El.) [38]	$e_p$	1,2	NOK/kWh
Nominellrenten	$i$	7	%

### 3.5.4 Innstillinger for optimaliseringsalgoritmen

Potensielle løsninger kalles partikler, mens et sett med partikler er kjent som en befolkning. Posisjonen til partikler er oppdatert gjennom en oppdateringsligning og PSO-algoritmeparametere definerer endringen av hver partikkel fra ett steg til et annet. Tabell 12 er uthentet fra GenOpt sin PSO-algoritme og viser forskjellige parametere brukt til simuleringen.

Tabell 12: Parameterverdier brukt av PSO-algoritmen

Algoritme parameter	Verdi
Neighbourhood topology	Von Neumann
Neighbourhood size	3
Number of particles	12
Seed for random number generator	0
Number of generations	10
Cognitive acceleration	2,8
Social acceleration	1,2
Constriction gain	0,5
Maximum velocity discrete	4

### 3.5.5 Grafisk skript

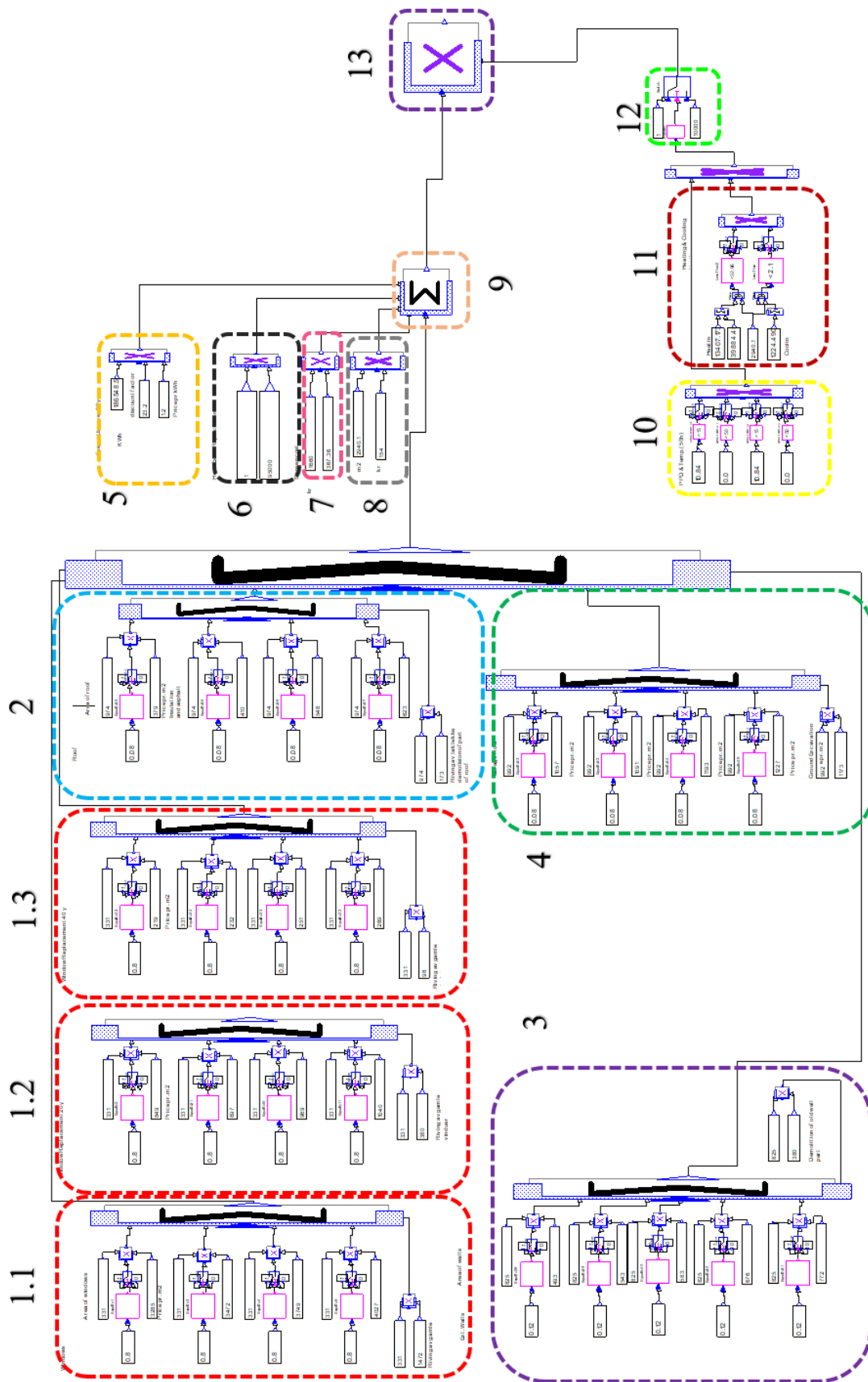
Videre må det lages et grafisk skript innenfor IDA ICE som kan beregne totalprisen for hver løsning den kombinasjonsmatrisen lager. Dette er en måte å programmere i IDA ICE uten å

måtte lære seg koding. Det fremgår på den måten at logikken defineres ved å bruke grafiske kodingselementer.

Alle ledd i ligningene 29 og 30 blir regnet ut manuelt for å finne diskonteringsfaktoren av 60 års driftstid. De beregnede verdiene for  $LCC_e$ , med data fra tabellen over, vil da bli implementert i grafiske skriptet i IDA ICE. Dette automatiserer hele beregningsprosessen av bygningens LCC. Hver av disse overnevnte parametere med deres tilhørende variasjonsområdet blir så gitt til verktøyet «Parametric Run» under IDA ICE, slik at den kan lage en matrise av dem. Priser til konstruksjonselementer er hentet fra Norsk Prisbok, og energipriser hentet fra Statistisk Sentralbyrå. Vedlegg B viser disse prisene.

Figur 10 viser oppsettet av det grafiske skriptet skrevet i IDA ICE. Figuren er nummerert med tall for hver prosess den gjennomgår og beregner.





Figur 10: Grafisk skript.

### 3.5.5.1 Beskrivelse av alle prosesser

#### 1. Vinduer

Her vil skriptet lese av u-verdien til vinduene fra simuleringen og sjekke det mot forhåndsbestemte u-verdier i den delen av skriptet. Dersom u-verdien samsvarer med en av kommandoene, vil skriptet gå videre og gange det totale vindusarealet til bygget med kvadratmeterprisen for vindu med den aktuelle u-verdien. Summen av de sendes til boks nr. 9. Nederst i denne delen er også areal av vinduene ganget med kvadratmeterpris for riving av gamle vinduer, lagt inn.

1.1. Denne delen er ment for utskifting av vinduer etter 20 år. Her vil skriptet gjøre akkurat samme prosessen som i 1.1, men da ganges vindusarealet med nåverdien av pris for utskifting av vindu om 20 år, samt nåverdi av riving av vinduer.

1.2. Denne delen er også som i 1.2, men dette er for utskifting av vinduer etter 40 år.

2. I boks nr. 2 vil skriptet lese av u-verdien til taket fra simuleringen og sjekke det mot forhåndsbestemte u-verdier i den delen av skriptet. Dersom u-verdien samsvarer med en av kommandoene, vil skriptet gå videre og gange byggets totale takareal med kvadratmeterprisen for takisolasjon for den aktuelle u-verdien. Summen av det sende videre til boks nr. 9. Nederst i denne delen er areal av taket ganget med kvadratmeterpris for riving av taktekke og montering av nytt tak, lagt inn.

3. vil totalarealet av ytterveggen ganges med kvadratmeterprisen av veggisolasjon for den aktuelle u-verdien. Summen sendes videre til boks nr. 9. Nederst i denne delen er arealet av ytterveggen ganget med pris for riving av deler av veggen, lagt inn.

Her er vil igjen, u-verdien til garasjeggulvkonstruksjonen leses av simuleringen og sjekkes mot redefinerte u-verdier i boksen. Dersom u-verdien samsvarer med en av u-verdiene lagt inn u kommandoer i boksen, vil skriptet gange totalarealet til gulvkonstruksjonen med kvadratmeterprisen for nytt gulv. Samtidig vil skriptet ta med totalprisen gravearbeid før bygging av nytt gulv. Totalsummen av den sendes videre til boks nr. 9.

4. I denne boksen er totale energiforbruket til bygget gjennom et år leses av simuleringen. Deretter vil den ganges med diskonteringsfaktoren beregnet for 60 års levetid og dagens energipris E. Totalsummen av den sendes videre til boks nr. 9.

5. I boks nr. 6, er det antall ganger utskifting av varmegjenvinner som er lik 2, ganges med prisen av det. Totalsummen av den sendes videre til boks nr. 9.

6. Her vil skriptet gange beregnet totalareal for solavskjerming med kvadratmeterpris for nytt solskjermingssystem. Totalsummen av den sendes videre til boks nr. 9. (det må nevnes at totalareal av solskjerming er noe større enn vindusareal. Solskjermingsareal finnes i vedlegg B).
7. Under denne delen vil skriptet beregne forbedringsutgiften knyttet til overgang fra SFP 2,5 [kW/m<sup>3</sup>/s] til 1,5 [kW/m<sup>3</sup>/s]. Dette gjøres ved å gange byggets totalareal med beregnet forbedringsutgift knyttet til byggets luftmengder [m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>]. Verdien sendes videre til boks nr. 9.
8. Her vil summen av alle initialinvesteringer legges sammen og sendes videre til boks 12.
9. Under denne dele vil skriptet sjekket om komfortbegrensninger til 2 mest utsatte soner er tilfredsstilt. Dersom svaret er JA, vil skriptet sende tallet 1 videre. Dersom svaret er NEI, vil skriptet sende tallet 0 videre.
10. Her vil skriptet sjekket simulert energiforbruk [kWh/m<sup>2</sup>] (både kjøling og oppvarming), mot maksimum beregnet energiforbruk som er tillatt for den aktuelle byen [kWh/m<sup>2</sup>]. Dersom det tilfredsstiller det kravet vil skript send tallet 1 videre, dersom det ikke er inntruffet, vil tallet 0 sendes videre.
11. I dette steget, vil skriptet gange resultatet av boks 10 og 11. Hvis resultatet er 1, vil bryterknappen brukt i denne boksen, sende tallet 1 videre og dersom resultatet er 0, tallet 10000.
12. I denne boksen vil tallet fra boks 9, som er investeringskostnader  $IC_m$ , operativkostnader  $IC_e$  og utskiftningskostnader  $RC$ , ganges med tallet fra boks 12. Dersom tallet fra boks 12 er 10000, vil resultatet bli alt for stort og regnes ugyldig. Altså komfortkriterier er ikke tilfredsstilt. Dersom tallet fra boks 13 er 1, vil resultatet være mye lavere og det betyr at komfortkriterier er tilfredsstilt. Resultatet av denne boksen sendes så til Parametric Run og dens rolle sette tim «MIN». Det betyr at programmet prøver å minimere denne verdien/kostnaden mens den passer på at alle begrensninger er tilfredstilte.

### 3.6 Fremgangsmetoden

Fremgangsprosessen for å besvare denne forskningsoppgaven har vært å foreta litteratursøk for å danne et teorigrunnlag og finne ut av dybden til oppgaven, samt å kunne avgrense den. Deretter, basert på det grunnlaget, har det blitt satt opp strategier til måten problemstillingen skal kontres og løses. Her har kritiske parametere, som er utslagsgivende med hensyn til inneklimate, energibruk og komfort, valgt ut og lagt fokus på.

Som nevnt, er denne undersøkelsen baserer seg på en metode av optimalisering som kun skal minimere en verdi, en såkalt «single-objective» optimalisering. Figur 11 viser flytskjemaet for hele optimaliseringsprosessen. Denne prosessen vil innebære følgende steg:

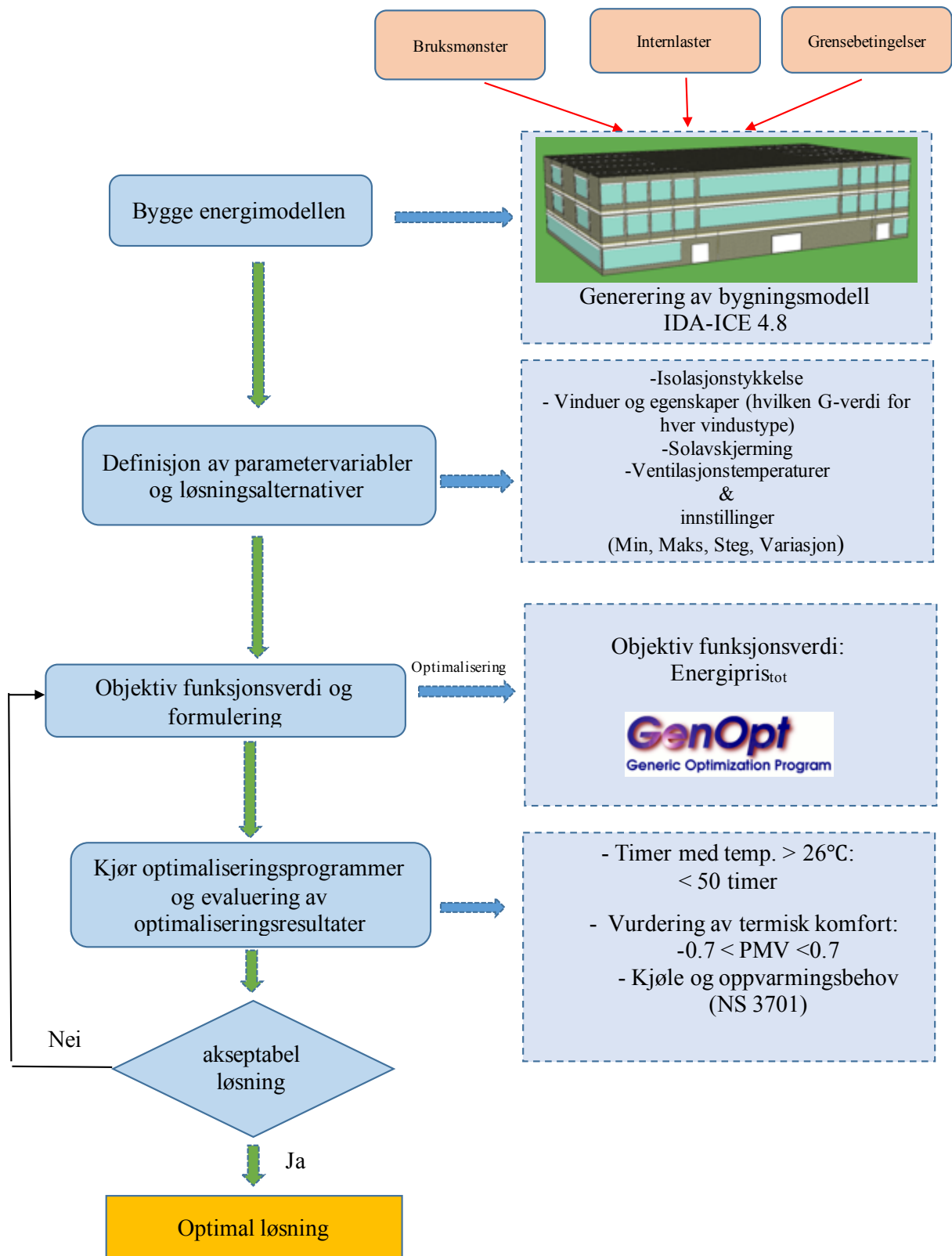
1. Definere beslutningsvariabler og løsningsalternativer for referansebygget
2. Formulere den objektive funksjonen
3. Kjøre optimeringsprogram og evaluering resultater av simuleringen

Som figuren viser er referansebygget modellert, simulert i IDA ICE versjon 4.8. Resultatene fra referansebygget blir innhentet etter energisimulering av referansebygget. IDA ICE sin innputt fil, som er en tekstfil blir tatt ut og gitt til optimaliseringsverktøyet. Deretter vil en gjentakende, automatisert, simuleringsbasert optimaliseringsprosess starte opp. Itererte simuleringer av bygningsmodellen med varierte verdier og typer for hver parameter, vil da endre energiforbruket og komfort i bygget. Denne endring vil kunne gi oss en bedre forståelse av hvordan ytelsen til bygget forandrer seg med den variasjon. Når resultater er klare, vil de bli sjekket mot komfortkriterier av de mest kritiske soner, definert i det grafiske skriptet.

For komfortkrav velges det å bruke gjennomsnitts PPD<15% og antall tillatte timer med temperaturer over 26°C som er fra NS 3031 (Th>26°C). For energikrav skal modellen tilfredsstille krav stilt i NS 3701 som ser på kjøle- og oppvarmingsbehovet i et bygg. Kravet regnes ut basert på lokasjon av bygget samt utetemperaturer. Tabell 13 viser beregnede verdier for kjøle- og oppvarmingsbehov i Oslo, Stavanger og Tromsø. Parametere brukt i tabellen er forklart i 2.1.3.

Tabell 13: Kjøle- og oppvarmingsbehov i aktuelle byer.

	Oslo	Stavanger	Tromsø
Øm T	6,1	7,8	7,8
DUTs	26,7	23,2	23,2
B	1,4	1,4	1,4
Kjølebehov	9,38	4,48	4,48
Oppvarmingsbehov	20,72	20	20



Figur 11: Flytskjemaet til hele optimaliseringsprosessen.

### **3.6.1 Evalueringsmetode for vurdering av modellene**

Studiemodellen til denne oppgaven er modellert og utviklet i IDA ICE. Alle mulige innstillingen og innputtverdier brukt i den modellen er beskrevet og gjennomgått i kommende kapittel. I utgangspunktet er en modell med TEK10 (2010) og NS 3031 minimumsverdier for energisimulering blitt bygget, slik at den skal representere vårt renoveringsbygg (referansemodell). Denne modellen skal tilfredsstille alle energi- og komfortkravene til TEK10 etter simulering.

## 4 Resultat og diskusjon

For vurdering av effekten av scenario 1 og 2 på referansebygget, i Oslo, Stavanger og Tromsø, utføres det en dynamisk simulering av referansebygget i hver by. Dette gjøres for å ha referansedata for bygget, slik at det kan sammenlignes med resultatet fra optimaliseringene. Deretter vil referansebygget optimaliseres med parametrisk analyse og GenOpt. Denne parametriske analysen er basert på dynamisk simulering av bygget over et helt år. Fokuset i oppgaven er på å finne ut hvilken kombinasjon av endringstiltak vil kunne gi lavest mulig livssyklus-kostnader (LCC), samtidig som bygget tilfredsstillende Passivhus- og komfortkrav.

### 4.1 Energibruk i referansebygget

Under denne delen, vil det ses på data fra referansebygget i hver av byene Oslo, Stavanger og Tromsø. Etter å ha foretatt en dynamisk helårssimulering av bygget, har vi fått følgende resultater av bygget, vist i Tabell 14.

Tabell 14 Referanseenergi data fra Oslo, Stavanger og Tromsø

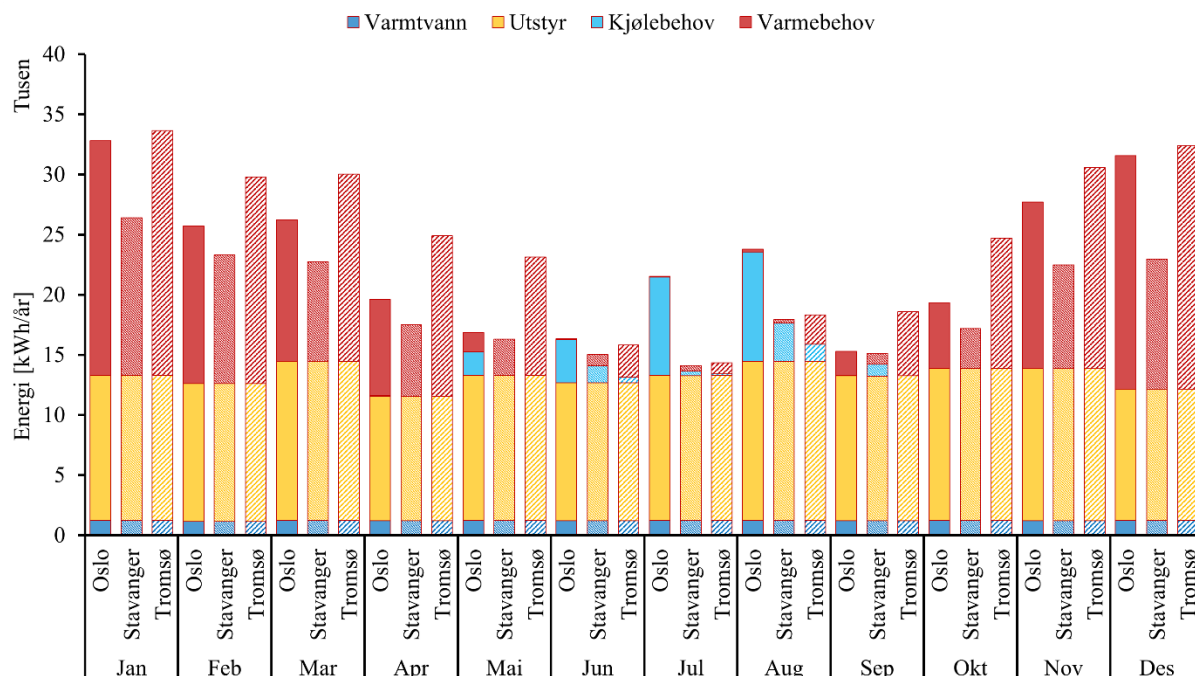
Type	Spesifikt kjølebehov [kWh/m <sup>2</sup> ]	Spesifikt varmebehov [kWh/m <sup>2</sup> ]	Spesifikk total energi [kWh/m <sup>2</sup> ]
Oslo	7,79	32,34	113,3
Stavanger	2,03	22,58	100,2
Tromsø	0,69	46,09	126,4

Som det kan lese fra tabellen over, er det store forskjeller i energibruk for referansebygget i de forskjellige byene. Oslo av de byggene, har størst kjølebehov med 7,79 [kWh/m<sup>2</sup>] og Tromsø lavest med 0,69 [kWh/m<sup>2</sup>]. Stavanger derimot ligger mellom de 2 med 2,03 [kWh/m<sup>2</sup>], ut i fra tallene ville en tolke det slik at Oslo er det sørligste punktet av disse tre byene og Tromsø er det nordligste av dem. Men det er ikke slik og det bare viser hvordan klima er så forskjellig i Norge.

Varmebehovet for de 3 byene er igjen som en skulle tro. Her har Stavanger lavest varmebehov per kvadratmeter areal med 22,58 [kWh/m<sup>2</sup>] og Tromsø det største varmebehovet med 46,09 [kWh/m<sup>2</sup>]. Oslo ligger i mellom disse to med 32,34 [kWh/m<sup>2</sup>]. Dette vil gi et mer riktig bilde av hvor disse byene er geografisk sett. For i Tromsø er det størst behov for oppvarming da det

er lengre vintersesong der, mens i Oslo er det noe mildere klima. Stavanger som er en mer vindutsatt området, har mildest vintersesong av de 3 byene og dermed er det mindre behov for oppvarming der.

Tabellen over viser at selv om referansebygget er av lik størrelse og bruksmønster, så ville bygget ha tilfredsstilt energikravet som er fremstilt i TEK10 (2010) som er på 150 kWh/m<sup>2</sup>. Men Tromsø ville ikke tilfredsstilt energibrukskravet for TEK17 som er på 115 kWh/m<sup>2</sup>. Ingen av byene har heller tilfredsstilt passivhuskravene for oppvarmingsbehov som vist i Tabell 13, men alle tre ville ligget under kravet for kjøling.



Figur 12: Månedlig oversikt over energisimulering fra Oslo, Stavanger og Tromsø.

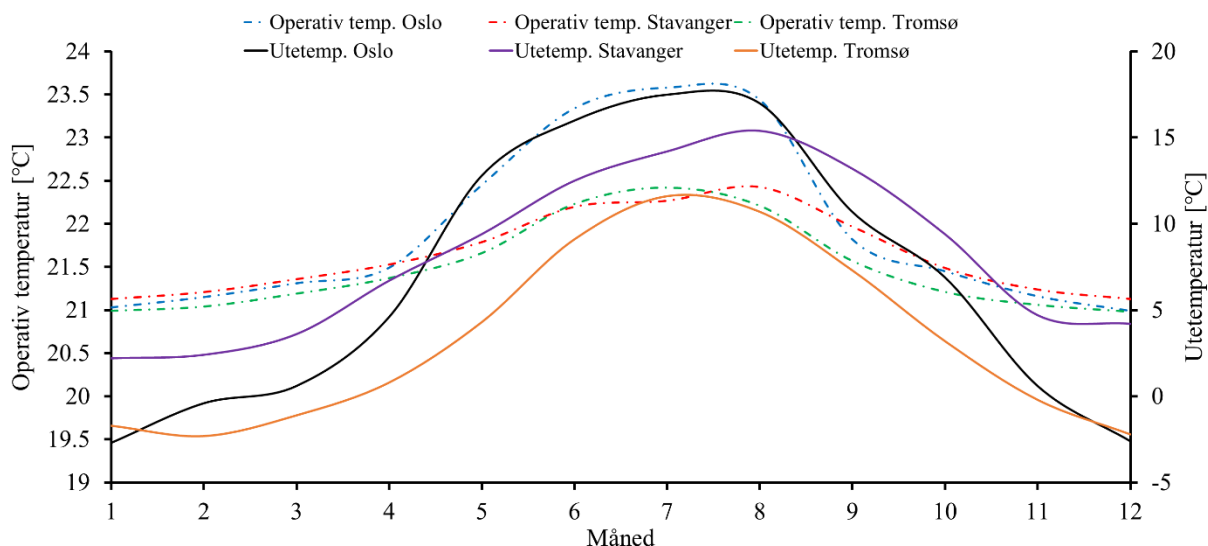
Figur 12 viser en månedlig oversikt over totalt energiforbruk i disse tre byene, hvor simuleringen av referansebygget er kjørt. Her det lett å se at varmtvannsbehovet er ganske likt i alle tre byene, og klimaet vil ikke ha noe effekt på det. Dette er siden varmtvannsbehovet er beregnet etter gjennomsnittsforkbruk per kvadratmeter gulvareal per år [kWh/m<sup>2</sup>.år].

Videre viser tabellen at energibehovet for utstyr er veldig likt mellom alle tre byer for hver måned, men at det er forskjeller mellom måneder. Grunnen til det ligger i det at antall arbeidsdagen i hver måned er veldig varierende da ikke alle måneder har like mange dager. I tillegg har fridager og helligdager som ligger i hver måned er veldig annerledes.



Når det kommer til oppvarmingsbehovet, vil Stavanger har største forbruket blant de tre byene. Det er igjen skyldes at Tromsø ligger så langt opp i nord og har lengre vinterperiode enn de 2 andre byene. Her er det oppvarmingsbehov året rundt hvor januar og desember skiller seg merkbart ut med et varmebehov på ca. 20 kWh/måned. Så er trenden slik at oppvarmingsbehovet avtar fremover mot sommeren og juli har det minste oppvarmingsbehovet på ca. 1,0 kWh/måned. For de andre byene er Stavanger den byen med lavest oppvarmingsbehov. Her igjen er det høyeste behovet i januar og desember, mens det laveste i juli. Oslo og Tromsø har nesten likt oppvarmingsbehov i de generelle vintermånedene (desember og januar), men det stopper der, for i de andre månedene av vinter er behovet tydelig mindre. I sommeren er Oslo den byen med nesten ingen behov for oppvarming, mens Tromsø har et oppvarmingsbehov selv i sommeren.

Når det kommer til kjølebehov, så er Oslo den byen hvor behovet for kjøling starter allerede i mai måneden men de andre har nesten ikke noe kjølebehov før i juni. Faktisk kunne Oslos kjølebehov i juni eller august, på egenhånd, dekt det samlede kjølebehovet for Stavanger og Tromsø gjennom året. Til slutt viser figuren at Stavanger er den byen som bruker litt energi på kjøling i september, mens de andre byene har ingen behov for det.



Figur 13: Grafisk fremstilling av gjennomsnittlige ute- og operativtemperaturer.

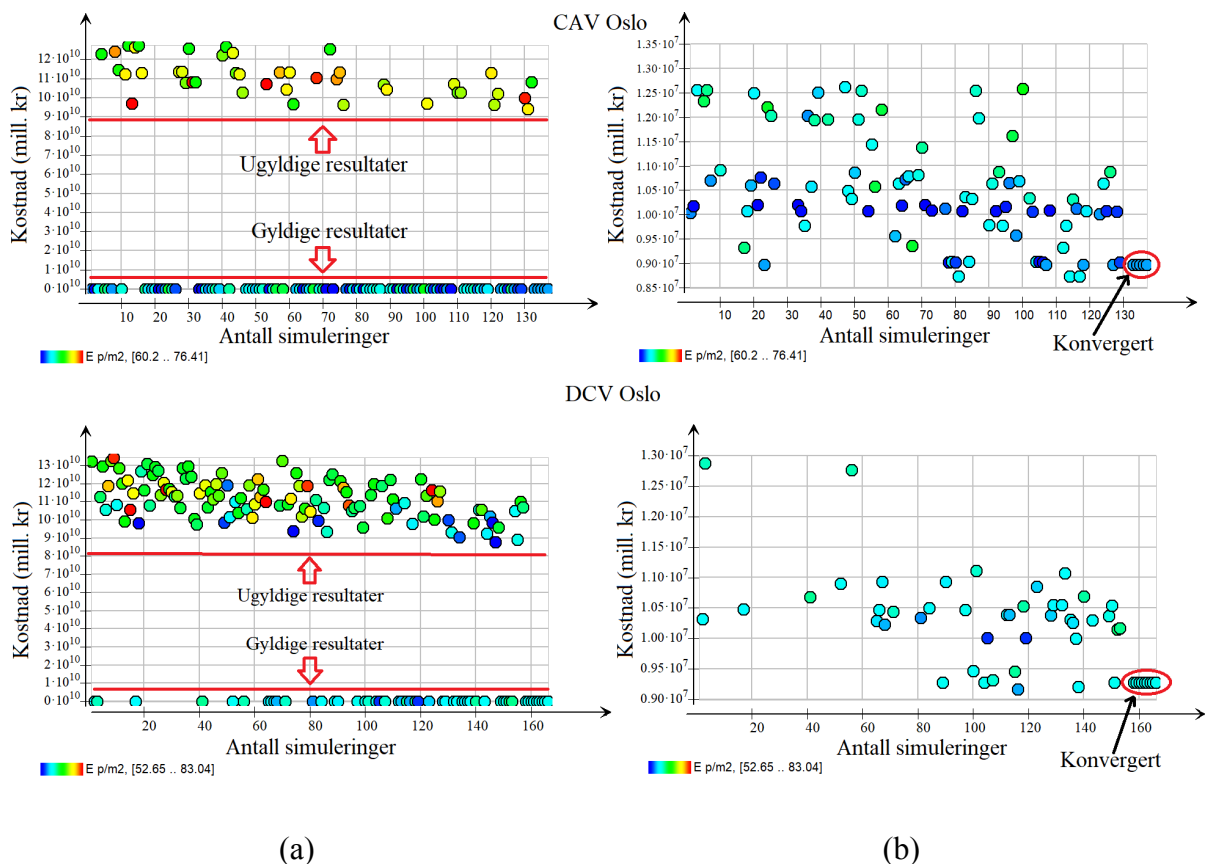
Når det gjelder temperaturer, vil Figur 13 vise en oversikt over hvordan gjennomsnitts ute- og operativtemperaturer utfolder seg i de tre byene. Figuren viser at Oslo og Tromsø har utetemperaturer som bikker under null in vinter månedene mens Stavanger går aldri under null,

i gjennomsnitt. I sommersesongen har Oslo høyest gjennomsnitt utetemperatur, selv om det ikke er de sørligste byene av de tre byene. Her er den høyeste gjennomsnittstemperaturen være på ca. 23,5 °C. Tromsø sin høyeste utetemperatur ligger på ca. 22,2 °C.

Alle tre byer har gjennomsnittlig operativtemperaturer som er innenfor settpunkt temperaturer som er satt i sonesettpunktene (21-24°C). Referansebygget klarer faktisk å holdet operativtemperaturen i Stavanger og Tromsø godt mellom 21-22,4 °C mens Oslo har noe høyere operativtemperatur i sommersesongen. Det igjen viser bekrefter hvorfor Oslo trenger hvorfor bygget har ett høyere kjølebehov enn de andre byene.

## 4.2 Optimaliseringsresultater

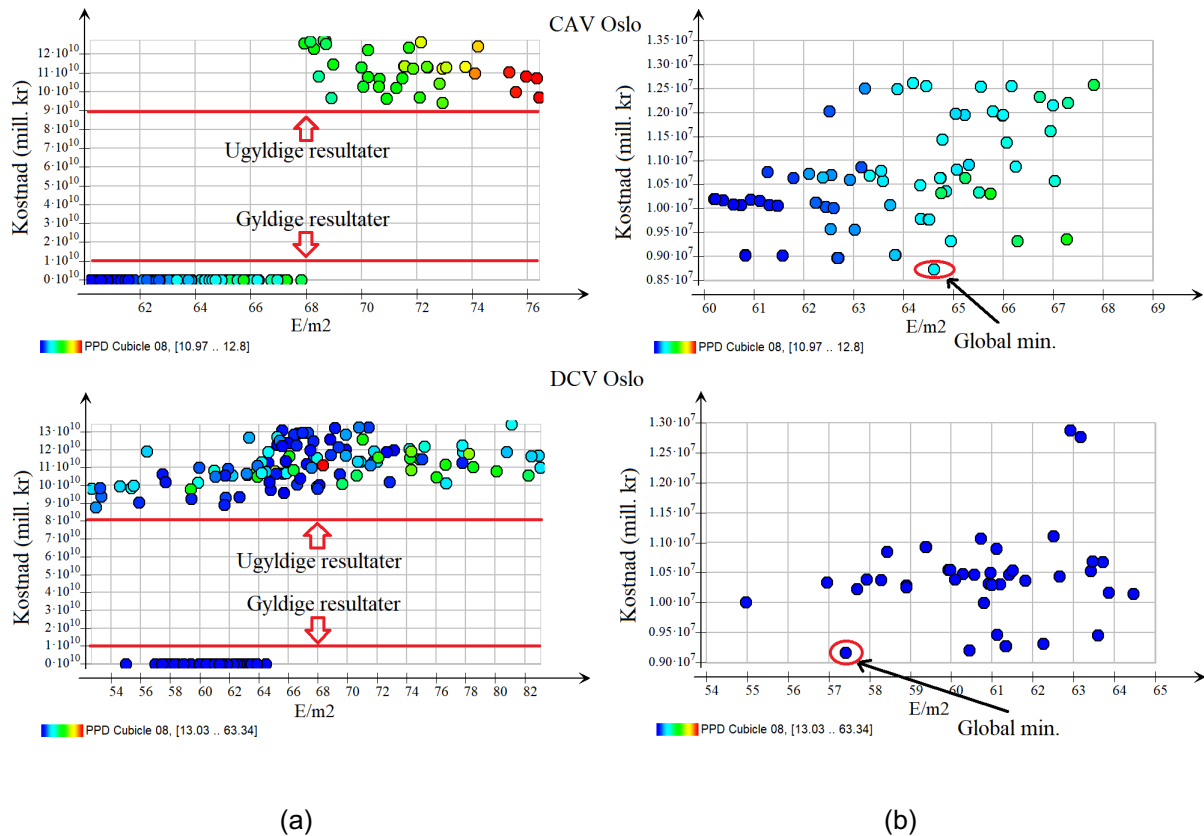
Referansebygget er gått gjennom neste prosess i flytskjemaet, hvor alle parametere med deres variasjonsområde blir gitt til GenOpt, som vist i Figur 11. Simuleringsprogrammet har brukt ulik tid og antall simuleringer på hver av byene.



Figur 14: (a) Effekt av begrensninger på optimalisering simulasjon. (b) Illustrasjon av konvergeringsprosess.

Figur 14 viser kun simulasjonsprosessen av referansebygget i Oslo, med antall simulering langs x-aksen og pris per simulering langs y-aksen. Det er valgt å ikke presentere prosessen fra de andre byene da, de vil vise lignende grafer. For optimalisering av referansebygget gjort for CAV modellen som vises i de to øverste grafene, viser grafen til venstre at GenOpt har brukt 137 simuleringer på å komme til en løsning. I grafiske skriptet ble det satt begrensninger til gyldige og ugyldige resultater. Der skulle skriptet gange gyldige resultater med tallet 1 og ugyldige resultater med  $10^4$ . Grafen viser tydelig at det er to områder med simuleringresultater, hvor den øvre delen er de ugyldige resultatene siden de er blitt ganget med  $10^4$  og området nederst i grafen viser gyldige resultater. Grafen til høyere for den viser det avgrensede området med gyldige resultater, hvor det røde, omringede området viser hvor prosessen har konverget. Det betyr at programmet har kommet frem til en løsning, til den objektive funksjonen. Lest langs y-aksen, viser grafen at området med gyldige resultater varer mellom ca. 8,5-13,0 millioner kroner.

Grafene nederst i figuren viser fremdriften av optimalisering av scenario 2 hvor GenOpt har brukt 166 simuleringer på optimaliseringen, hvor igjen gyldige og ugyldige resultater skiller seg tydelig. Med nærmere titt på det avgrensede området med gyldige resultater, vil grafen vise at i det røde omringede området har simuleringen konverget. Igjen vil en titt på x-aksen vise at gyldige resultater er forekommet mellom 9,0-13,0 millioner kroner.



Figur 15: (a) Illustrerer hele simuleringprosessen, samt sortering av gyldige og ugyldige resultater. (b) Illustrasjon av at programmet har funnet globalt minimum.

Figur 15 illustrer fremgangprosessen for optimalisering for hvert av scenarioene, hvor y-aksen representerer kostnaden tilknyttet til hver simulering og x-aksen viser energibruk per kvadratmeter [ $E/m^2$ ]. For scenario 1 vil grafen øverst til venstre i figuren over vise at gyldige og ugyldige resultater er blitt separert, og at variasjonsområdet av energibruk er mellom 60,0-77,0 kWh/m<sup>2</sup>. Grafen til høyere viser hvor den globale løsningen, med minimert kostnad, er å finne i det røde avgrensede området. Her vil den optimale løsningen bruke ca. 57,4 kWh/m<sup>2</sup> energi i året, og ha en total kostnad for av LCC på ca. 8,8 millioner kroner over 60 års levetid.

For scenario 2 er variasjonsområdet for energibruk mellom 52,0-83,5 kWh/m<sup>2</sup>. Gyldige resultater har en variasjonsområdet av energibruk mellom 54,9-64,5 kWh/m<sup>2</sup> og en løsning med minimert kost på ca. 9,2 millioner kroner.

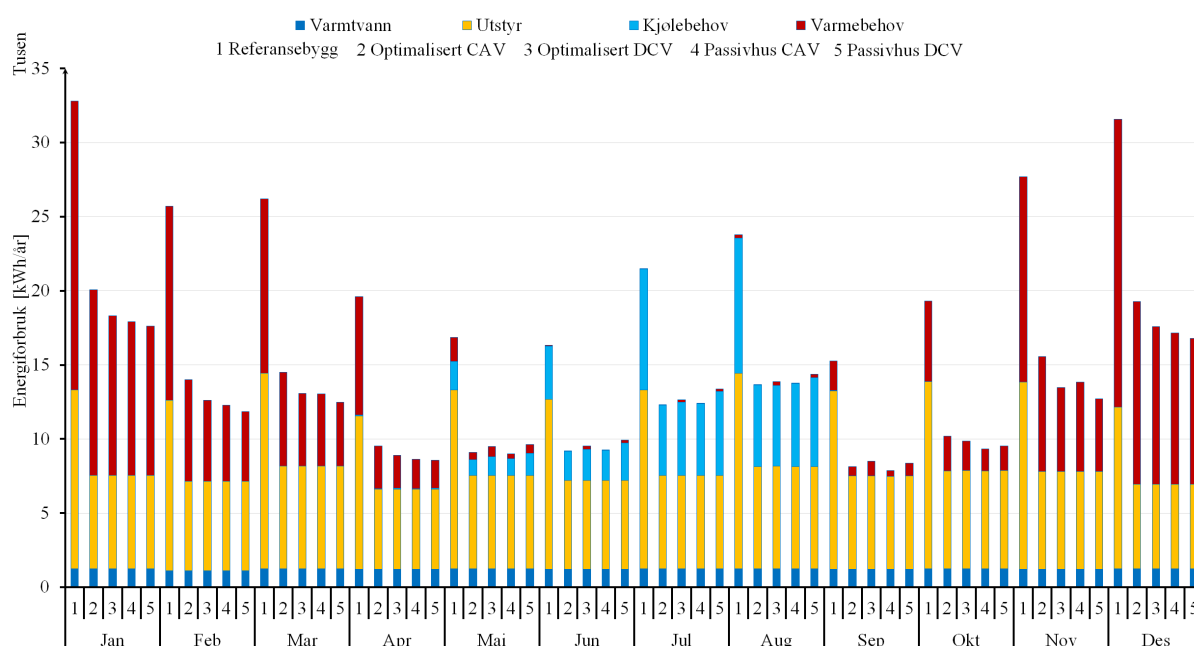
Et raskt sammenligning mellom de to figurene viser at scenario 1, selv med optimalisering, har større energibruk en scenario 2. Dette kommer av at i scenario 1 er det kun CAV ventilasjon og dette øker energiforbruket til bygget da ventilasjonsluftmengder er store og ikke basert på tilbakemelding fra sonene. Det vil da brukes unødvendig energi på overflødige luftmengder.

Resultater av endelige parametere fra hvert scenario og hver by finnes i vedlegg C.

### 4.3 Energi og temperaturer

I den delen vil det bli sett på resultater fra simuleringer gjort i hver by. Det er gjort 2 referansesimuleringer av hvert scenario med beste passivhusverdier fra variasjonsområdet (Passivhus CAV og Passivhus DCV). Her vil energidata og temperaturendringer mellom referansebyggene (TEK10 og 2 Passivhusmodeller) og begge optimaliseringsscenarioene (optimalisert CAV og optimalisert DCV) bli sammenlignet. Det må nevnes at «Passivhus DCV» scenario er simulert med ventilasjonsverdier fra opprinnelige referansebygget. Det vil si samme tilluftsmengder og kurve for tilluftstemperaturen. Dette viser hvilken effekt optimaliseringen har hatt på energibruken.

#### 4.3.1 Resultater fra Oslo



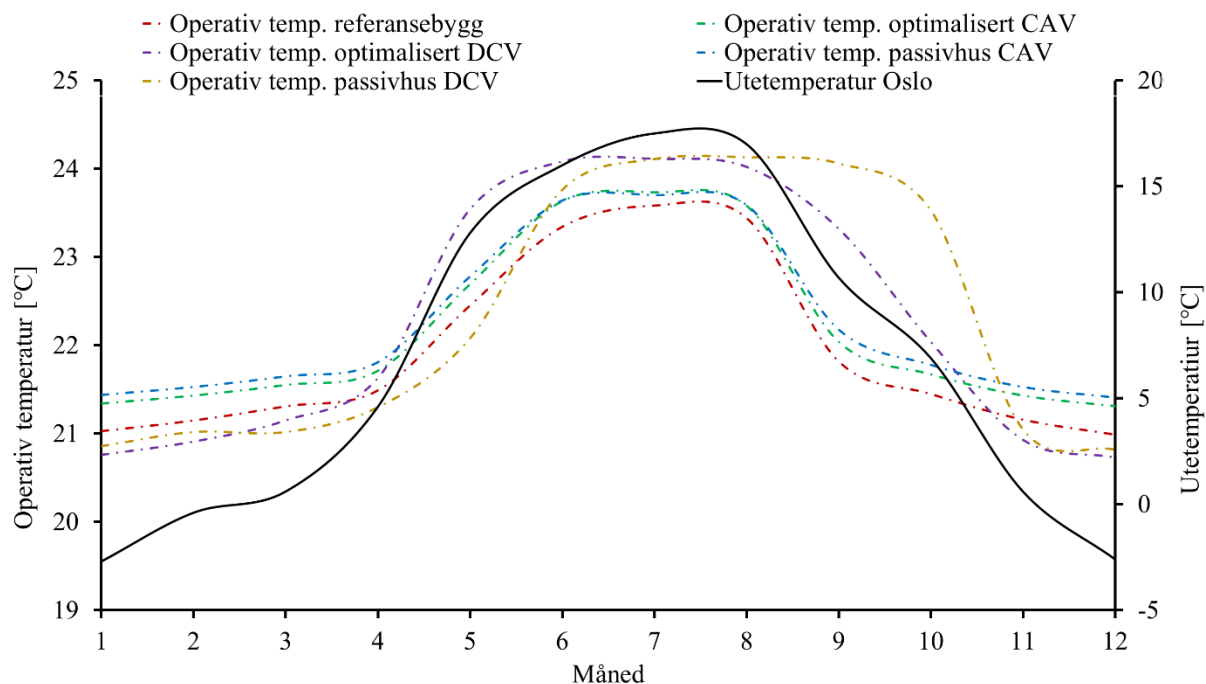
Figur 16: Illustrert månedlig oversikt over energiforbruk mellom alle simuleringsmodellene, i Oslo.

Grafen over viser data fra Oslo, hvor alle simuleringer er nummerert med sine tall for hver måned. Ved første øyekast er det tydelig at referansebygget har størst energiforbruk i alle postene utenom energibehovet til varmtvann. Siden det ble antatt at bygget skulle følge forbedret energiforbruk til postene belysning og utstyr, på henholdsvis 4 og 6 kWh/m<sup>2</sup>, har energiforbruket til utstyr og lys sunket merkbart med ca. 40% (lest fra grafen).

Tabell 15 Resultater fra alle simuleringer i Oslo

Type	Spesifikt kjølebehov [kWh/m <sup>2</sup> ]	Spesifikt varmebehov [kWh/m <sup>2</sup> ]	Spesifikk total energibruk [kWh/m <sup>2</sup> ]	Endring i totalenergibruk [%]
Referansebygg	7,79	32,34	113,30	-
Optimalisert CAV	4,53	17,76	64,54	43
Optimalisert DCV	4,69	14,96	57,56	49,2
Passivhus CAV	4,64	13,90	60,18	46,9
Passivhus DCV	5,36	13,40	55,14	51,3

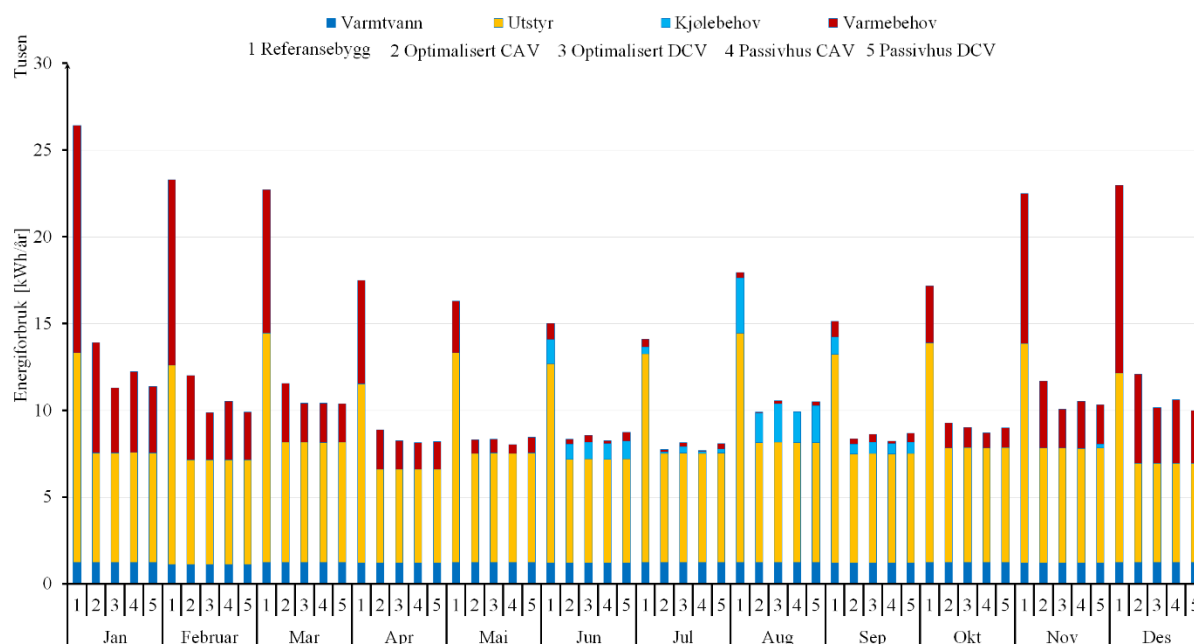
Tabell 15 viser simuleringssdata av alle simuleringer hvor data for spesifikt kjølebehov, spesifikt varmebehov, total energibruk og endring i totalenergibruk er presentert. Endringene er sammenligningen av alle simuleringer mot referansebygget. Referansebygget har et spesifikt kjølebehov på 7,79 kWh/m<sup>2</sup> og et spesifikt varmebehov på 32,34 kWh/m<sup>2</sup>. Passivhusstandarden krever at kjølebehovet skal ligge under 9,38 kWh/m<sup>2</sup> (beregnet for Oslo) og varmebehovet skal ligge under 20,72 kWh/m<sup>2</sup> (beregnet for Oslo). Her er det spesifikke kjølebehovet allerede under kravet mens oppvarmingsbehovet ligger langt over. Etter endt simulering av alle modeller for Oslo, ser vi at alle scenarier har betydelig reduksjon i energi bruk i hver post. Selv om kjølebehovet var bra nok fra før, så har forbedringene klart å redusere det med stor andel. Varmebehovet er også redusert til et mye lavere nivå. Totalt sett (sammen med reduksjon av energibruk til belysning og utstyr) har bygget fått en mye lavere energibruk, noe kolonnen til høyere i tabellen viser. Sammenlignet med referansebygget, av optimaliseringsscenarioene, kommer «optimalisert DCV» best ut hvor simuleringen har klart å redusere energibruk med hele 49,2%. «Optimalisert CAV» kommer på andre plass med 43% forbedring. Derimot klarer «passivhus CAV» og «passivhus DCV» å redusere det ytterligere til henholdsvis 46,9% og 51,3%. For «optimalisert CAV» skyldes det uendret tak og fundamentgulv. For «optimalisert DCV» er dette grunnet endring i temperaturkurven samt uendret fundamentgulv. Altså GenOpt har simulert mot minimum kostnad og dermed vil disse postene gi negativt utslag i energireduksjonen.



Figur 17: Grafisk fremstilling av gjennomsnittlige ute- og operativtemperaturer fra modellen, i Oslo.

Figur 17 viser gjennomsnittstemperaturforløpet til både ute- og operativtemperaturer, for Oslo. Her er det lett å se at det klassiske problemet med passivhus dukker opp når bygget er blitt optimalisert. Operativtemperaturen i alle scenarier har steget i store deler av året. For sammenligning kan det ses at «optimalisert CAV» scenario i gjennomsnitt 0,4 °C stigning i operativtemperatur mens «passivhus CAV» har økt med enda mer, men ikke merkbart mer enn den optimaliserte modellen. Når det gjelder «Optimalisert DCV» har operativtemperaturen holdt seg bra på vinterstid og til tider under kurven for referansebygget, mens på sommerstid har kurven steget med ca. 0,5-1,0 °C. «Passivhus DCV» kurven viser omtrent samme trenden men her har problemet med operativtemperaturen begynner ikke før i slutten av mai måneden, men den er på en måte forskjøvet helt til desember.

### 4.3.2 Resultater fra Stavanger



Figur 18: Illustrert månedlig oversikt over energiforbruk mellom alle simuleringsmodellene, i Stavanger.

Søylediagrammet over viser, som i resultater fra Oslo, detaljert grafisk oversikt over månedlig forbruket til bygget over et år. Her er det lett å se hvilke måneder av året som har

Tabell 16 viser oversikt over det spesifikke energiforbruket for hvert av scenariene under optimaliseringen.

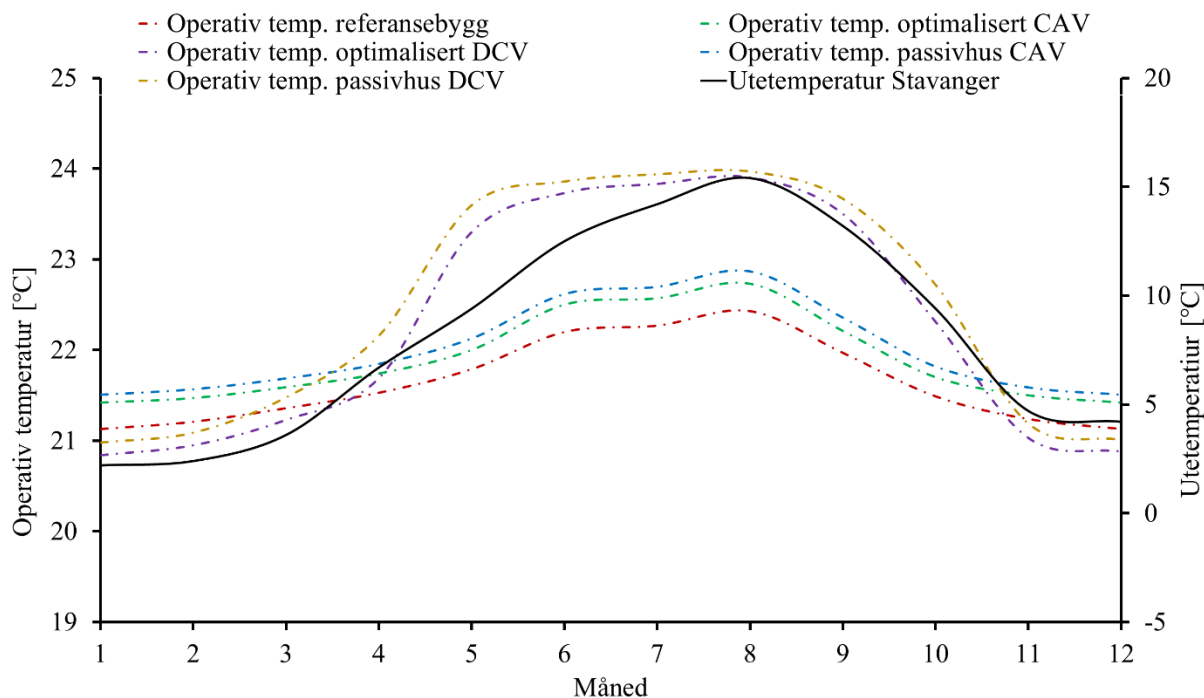
Tabell 16: Resultater fra alle simuleringer i Stavanger.

Type	Spesifikt kjølebehov [kWh/m <sup>2</sup> ]	Spesifikt varmebehov [kWh/m <sup>2</sup> ]	Spesifikk total energibruk [kWh/m <sup>2</sup> ]	Endring totalenergi [%]
Referansebygg	2,03	22,58	100,2	-
Optimalisert CAV	1,10	9,83	54,31	45,8
Optimalisert DCV	1,42	6,46	44,78	55,3
Passivhus CAV	1,14	6,80	50,86	49,3
Passivhus DCV	1,39	6,56	45,16	54,9



Som tabellen over viser har referansebygget fra Stavanger et spesifikt kjølebehov på 2,03 kWh/m<sup>2</sup> og et spesifikt varmebehov på 22,58 kWh/m<sup>2</sup>. Total spesifikk energibruk er på 100,2 kWh/m<sup>2</sup>. Beregnet krav for kjøling og oppvarming for Stavanger er på henholdsvis 20,0 kWh/m<sup>2</sup> og 4,48 kWh/m<sup>2</sup>. Her igjen har referansebygget et lavere spesifikt kjølebehov enn det av kravet, men på spesifikke varmebehovet er forbruket større enn kravet. Som i Oslo, har energiforbruket per post sunket betydelig etter optimaliseringene. Det er lett å se at kjølebehovet er nesten blitt halvert, mens oppvarmingsbehovet er blitt redusert til enda lavere nivå. Det som er interessant her, er at «Optimalisert CAV» har faktisk lavere spesifikt kjølebehov og et større varmebehov enn «Passivhus CAV». Selv om dette er minimalt, skyldes det nok at den optimaliserte modellen har ett mindre tett skall enn den av «Passivhus CAV». Dermed er det lettere for varmen å lekke ut. «Optimalisert DCV» har marginalt høyere energi forbruk på kjøling og marginalt lavere forbruk på oppvarming. Dette er litt mere kompleks da GenOpt har optimalisert mot minimumkostnad og klart å forbedre temperaturkurven til ventilasjonsaggregatet.

Når det gjelder endringsandelen sammenlignet med referansebygget, har «Optimalisert CAV» klart å redusere energiforbruket med 45,8% mot 49,3% for «Passivhus CAV». Dette er igjen fordi det er tettere bygg for «Passivhus CAV» mens «Optimalisert CAV» har uendret fundamentgolv og tak fra referansebygget. Scenarioet «Optimalisert DCV» klarte å redusere energiforbruket mer enn hva «Passivhus DCV» har klart, med henholdsvis 55,3% og 54,9%. Dette igjen er mer kompleks en CAV, da det er optimalisering av temperaturkurven til ventilasjonsaggregatet i bildet. Den har klart, i sammenheng med resten av parameterendringene, å redusere energien bedre enn det optimale scenarioet «Passivhus DCV».

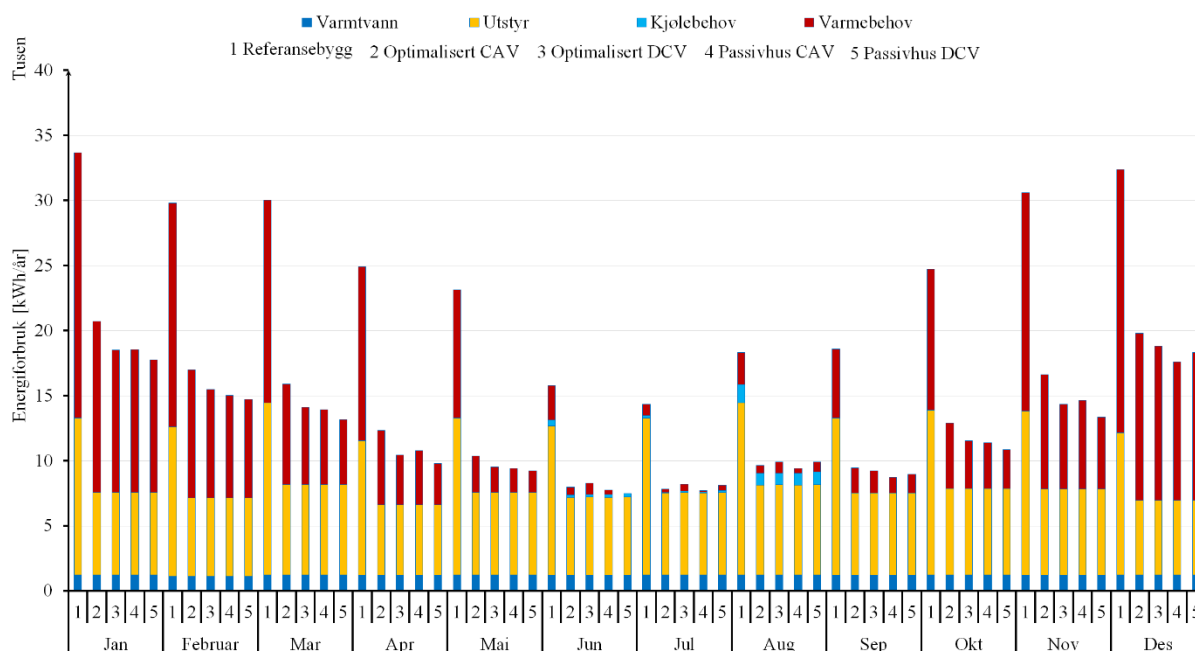


Figur 19: Grafisk fremstilling av gjennomsnittlige ute- og operativtemperaturer fra modellen, i Stavanger.

Når det gjelder temperaturforløpet, har bygget bedre trend enn Oslo, det vil si mer forutsigbar kurve. Igjen har gjennomsnittsoverativtemperaturen steget over den av referansebygget over store deler av året. For «Optimalisert CAV» og «Passivhus CAV» er stigningen på ca. 0,3-0,4 °C jevnt gjennom året. «Optimalisert DCV» og «Passivhus DCV» har igjen en høyere stigning gjennom sommermånedene. Dette skyldes nok at bygget driftes annerledes og at høyere operativ temperatur er en kjent gjenganger for bygg som operer med ventilasjonsoppvarming og kjøling. Det som er verdt å merke her er at begge de optimaliserte scenarioene har noe bedre operativtemperaturer enn passivhus referansebyggene. Grunnen til det er nok at det er noe mindre solfylte dager i Stavanger enn det som er i Oslo, og dermed er det mindre direkte oppvarming grunnet solinnstråling.

### 4.3.3 Resultater fra Tromsø

Igjen viser søylediagrammet under månedlig oversikt over detaljert utfoldelse av energiforbruk mellom de forskjellige scenariene. Her er det tydelig at Tromsø et høyt behov for oppvarming og veldig få måneder med kjølebehov. Samtidig er det lett å se hvilke måneder som har hatt størst reduksjon i energiforbruk. Det er måneder som mai, juni og september.



Figur 20: Illustrert månedlig oversikt over energiforbruk mellom alle simuleringsmodellene, i Tromsø.

Søylediagrammet over, viser hvordan resultatene er sammenlignet med hverandre. Dette er månedsvise sammenligning av energiforbruk.

Som i de andre byene vil Tabell 17 vise en oversikt over det spesifikke energiforbruket til bygget blant de forskjellige scenarioene.

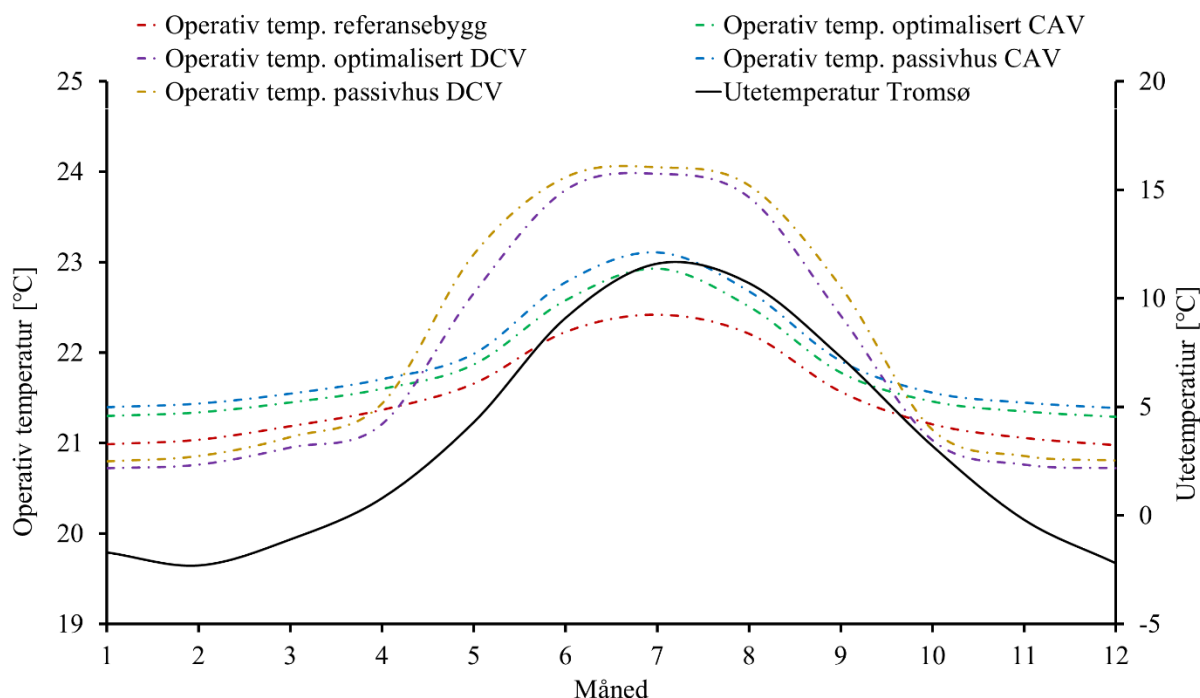
Tabell 17: Resultater fra alle simuleringer i Tromsø.

Type	Spesifikt kjølebehov [kWh/m <sup>2</sup> ]	Spesifikt varmebehov [kWh/m <sup>2</sup> ]	Spesifikk total energiforbruk [kWh/m <sup>2</sup> ]	Endring totalenergi [%]
Referansebygg	0,69	46,09	126,4	-
Optimalisert CAV	0,39	23,58	69,68	44,8
Optimalisert DCV	0,41	19,41	60,35	52,3
Passivhus CAV	0,42	18,27	63,61	49,6
Passivhus DCV	0,49	17,29	57,29	54,7

Tabellen over viser at referansebygget fra Tromsø har et spesifikt kjølebehov på 0,69 kWh/m<sup>2</sup> og et spesifikt varmebehov på 46,09 kWh/m<sup>2</sup>. Total spesifikk energiforbruk er på 126,4 kWh/m<sup>2</sup>. Beregnet krav for kjøling og oppvarming for Stavanger er på henholdsvis 32,96 kWh/m<sup>2</sup> og 2,1

kWh/m<sup>2</sup>. Igjen er kjølebehovet til referansebygget under det av passivhus men oppvarmingsbehovet overskrider passivhuskravet med ca. 13,5 kWh/m<sup>2</sup>.

Optimaliseringsresultatene viser at scenarier med optimalisering har mindre kjølebehov og større oppvarmingsbehov enn scenarier med optimale passivhus parametere. Tabellen viser at scenarioet med «Optimalisert CAV» har klart å redusere kjølebehovet ned til 0,39 kWh/m<sup>2</sup> og oppvarmingsbehovet ned til 23,58 kWh/m<sup>2</sup> mot henholdsvis 0,42 kWh/m<sup>2</sup> og 18,27 kWh/m<sup>2</sup> for «Passivhus CAV». Samtidig har «Optimalisert DCV» et kjølebehov på 0,41 kWh/m<sup>2</sup> og et oppvarmingsbehov på 19,41 kWh/m<sup>2</sup> mot henholdsvis 0,49 kWh/m<sup>2</sup> og 17,29 kWh/m<sup>2</sup>. Gjennom simuleringene her har «Optimalisert CAV» klart å redusere det totale energiforbruket med 44,8% mot 49,6% for «Passivhus CAV», sammenlignet med referansebygget. For «Optimalisert DCV» har simuleringen klart å redusere det totale energiforbruket med 52,3% mot 54,7% for «Passivhus DCV». Igjen har GenOpt optimaliseringen latt være å endre på parametere som tak og fundamentgulv når det gjelder «Optimalisert CAV». Det samme gjelder for «Optimalisert DCV» da GenOpt har endret på at unntatt fundamentgulvet. Siden den objektive funksjonen var å redusere kost, dermed har bygget noe mindre optimalt skall. Dermed er det lettere for varmen å lekke ut mot det frie.



Figur 21: Grafisk fremstilling av gjennomsnittlige ute- og operativtemperaturer fra modellen, i Tromsø.

Endringen i gjennomsnittstemperaturer i Tromsø er vist i grafen over. Her er trenden omtrent lik som i Stavanger. Det betyr at for «Optimalisert CAV og «Passivhus CAV» har

gjennomsnittsoperativtemperaturen steget med ca. 0,3-0,5 °C jevnt gjennom året. For «Optimalisert DCV» og har operativtemperaturen gått noe under det av referansebygget i vintermånedene mens på sommertid har den rykket opp ca. 2 grader mellom april og slutten av august. Igjen er det lett å se at de optimaliserte scenarioene har prestert bedre enn de av passivhus scenarier. Grunnen til det ligger igjen i at byggene er mindre tette og det er lettere for varmen å gå tapt gjennom skallet.

#### **4.4 Parametriske resultater**

I begge scenarier, både 1 og 2, har optimaliseringen kommet fram til alle parametere fra konstruksjonen er med verdier fra passivhusstandarden. Unntaket er garasje gulv og solavskjerming. Her har optimaliseringen valgt å beholde gulv på grunn, fra referansebygget. Til solskjermingsmateriale har optimaliseringen kommet fram til at Sunworker M393, med bronse farge, er det beste valget for alle optimaliserte modeller.

Når det gjelder temperaturkurven, har optimaliseringen også forbedret settpunktene i denne kurven for hvert av scenariene.

Parametriske resultater fra optimaliseringen vises i vedlegg C

#### **4.5 Vurdering av LCC**

Hoved poenget med optimalisering var å se hvilke løsninger vill gitt et minimalt med investering og driftskostnader, samtidig som det ikke skulle gå på bekostning av komfort for brukerne av bygget. Som det ble diskutert under resultater til hver by, kommer scenarier med best passivhus parametere stort sett best ut energimessig. Men det er lønnsomheten et prosjekt som driver det videre.

Tabellen under viser LCC av hver by for 60 års levetid. Her er alle scenarier blitt sammenlignet med deres referansebygg og en prosentvis besparelse er blitt beregnet. Tabellen viser at de optimaliserte scenarioene er de lønnsomme løsningene mens de passivhus scenarioene viser negativ gevinst.

For Oslo er besparelsen for begge optimaliserte scenarioene omtrent like, hvor «Optimalisert CAV» har besparelse på 5,52% og «Optimalisert DCV» er på 5,87%. Til gjengjeld er

forskjellen mellom «Optimalisert CAV» og «Passivhus CAV» på 15,04%. Forskjellen mellom «Optimalisert DCV» og «Passivhus DCV» på 16,65%. Isolert sett, hvor kun hvert scenario (enten CAV eller DCV) blir sammenlignet med sine referansebygg over og under seg, vil «Operativ DCV» ha størst besparelse av å optimalisere. Men selv når de optimaliserte modellene med deres kostnadsbesparelse fra Tabell 18 og energibesparelse fra Tabell 15 blir dratt inn i beregningen, er den «Optimalisert DCV» den mest lønnsomme løsningen for Oslo.

Stavanger dataene er noe annerledes. Her vises det er enda større sprik mellom de optimaliserte modellene og referanse modeller. Passivhus referansemodellene har over 14% negativ gevinst. «Optimalisert CAV» har 3,44% besparelse mot 0,67% av «Optimalisert DCV». Prosentvis kostnadsdifferanse mellom hver av disse modellene og deres passivhus referansemodeller er henholdsvis på 17,74% og 15,1%. Igjen vil isolert sett «Optimalisert CAV» være mest lønnsom av de to optimaliserte løsningene, sammenlignet med deres passivhus referansemodeller. Når data fra Tabell 16 blir også tatt hensyn til er «Optimalisert DCV» være den mest lønnsomme på sikt. Grunnen til det ligger i at i LCC beregninger her i denne forskningen, er det kun tatt med 1,0% økning i energipriser, og dersom den økningen blir større, vil mest sannsynlig «Optimalisert DCV» modellen komme best ut da energi besparelsen er ca. 10% bedre. Dermed er denne modellen den beste løsningen for Stavanger.

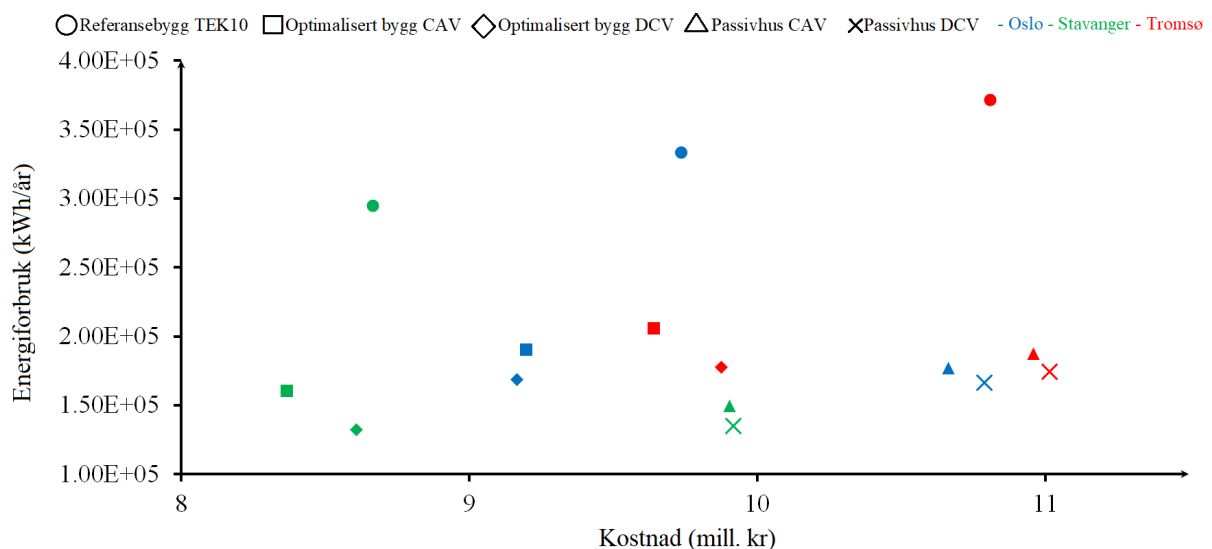
Tromsø er enda mer annerledes enn de andre byene. Her er besparelsen sammenlignet mot referansebygget størst av alle tre byer, hvor «Optimalisert CAV» har 10,8% besparelse mot 8,62% av «Optimalisert DCV». Differensen mellom optimaliserte modellene og deres passivhus referanse modeller er på 12,19% og 10,53% henholdsvis for CAV og DCV løsningen. Den differansen er lavere enn de andre byene. Hvis CAV og DCV isoleres for seg selv, vil «Optimalisert CAV» være den mest lønnsomme. Igjen, om det bare tas 1,0% økning i energipriser til betraktning, så vil «Optimalisert CAV» være den beste modellen for Tromsø, men om økningen skulle et par prosent høyere, vil mest sannsynlig «Optimalisert DCV» vær mest gunstig på sikt. Om prosent økningen i energi skulle være så ekstrem som 5%, så vil passivhus referansemodellen «Passivhus DCV» være den mest gunstige av dem alle, da den har størst energibesparelse.

Tabell 18: Livsykluskostnader i alle byer.

Scenario/By	LCC Oslo	Besparelse (%)	LCC Stavanger	Besparelse (%)	LCC Tromsø	Besparelse (%)
-------------	-------------	-------------------	------------------	-------------------	---------------	-------------------

	(kr)		(kr)		(kr)	
Referansebygg	9737265	-	8665175	-	10808410	-
Optimalisert CAV	9199380	5,52	8367170	3,44	9641194	10,80
Optimalisert DCV	9166003	5,87	8607360	0,67	9876802	8,62
Passivhus CAV	10663751	-9,51	9904304	-14,30	10958500	-1,39
Passivhus DCV	10786783	-10,78	9916041	-14,44	11014823	-1,91

Plottet under gjør det lettere å se hvordan de forskjellige scenarier har prestert etter simulering og optimalisering. Her viser x-aksen investering- og driftskostnader av bygget over 60 år, men y-aksen viser energiforbruket til bygget gjennom levetiden på 60 år.



Figur 22: Grafisk sammenligning av modellen i alle byer, med hensyn til livsyklus kostnader og energiforbruk.

Grafen viser at stort sett scenarier med optimalisering har kommet ut billigere enn deres referansemodeller (referansebygget og passivhusmodellene). Her har Stavanger modellen til og med spart noe på energiforbruket, selv om det er marginalt.

Disse resultatene og beslutningene må ses i større bilde da marginene er på noen prosenter i noen tilfeller. Dermed må det veies opp om beboerne vil trives bedre med en DCV løsning, enn CAV løsning. DCV er mye mer utbredt løsning nå og sett ut i fra energitabellene fra hver by, kommer den løsningen best ut energimessig. Dermed må det vurderes om en total renovering av alle elementer (også tak og fundamentgulv), er veien å gå, da en større økning i energipriser vil dytte konklusjonen mot et slikt tiltak.





## 5 Konklusjon

Ved renovering av klimaskjermen og optimalisering av ventilasjonsparametere som temperatur og luftmengder, i eksisterende bygg, vil energibehovet reduseres betydelig. Simuleringene viste at det er mulig å oppnå energikrav stilt i passivhusstandarden NS 3701 (kontorbygg) uten å måtte forbedre absolutt alle elementer i klimaskjermen. Resultatene viste at energibesparelsen i Stavanger (mildest klima) var størst ved scenario 1 (CAV og klimaskjermforbedring), av alle tre klima, og minst ved Oslo (ikke kaldeste klimaet). Tromsø havnet mellom disse 2. Besparelsene ved scenario 1 var 43% (Oslo), 45,8% (Stavanger) og 44,8% (Tromsø). Ved scenario 2 (DCV og klimaskjermforbedring), var resultatene fortsatt som over. Her var besparelsen i Oslo 49,2%, Stavanger 55,3% og Tromsø 52,3. Simuleringen av referansebyggene med fullverdige passivhuselementer viste seg å yte enda bedre med noen prosent forbedringer i energibesparelsen, mot de optimaliserte modellene. Dette var grunnet forbedring av gulv på grunn i disse modellen. Unntaket her var Stavanger som hadde ca. 1% bedre energibesparelse enn den fullverdige passivhusmodellen (scenario 2). Energimessig viser dette at en optimalisering har størst effekt i klima med mildere vær, som i Stavanger.

Når livsykluskostnader blir også vurdert, viste det seg at selv om de passivhusmodellene hadde størst energibesparelse, så var faktisk de optimaliserte modellene, både scenario 1 og 2, en positiv besparelse, sammenlignet mot referansebygget. Forskjellen her viste seg å være annerledes enn energieresultater. Her hadde Tromsø størst besparelse (10,8% scenario1 og 8,62% scenario 2), Stavanger minste (3,44% scenario1 og 0,67% scenario 2) og Oslo imellom dem (5,52% scenario1 og 5,87% scenario 2). Dette viser at selv om energibesparelsen er den økonomiske besparelsen størst i byer der det er størst behov for oppvarming, som i Tromsø.

Tallene viser også at fullverdig passivhusmodeller hadde større livsykluskostnader enn alle andre modeller. Dette er grunnet ingen optimaliserte ventilasjonsparametere samtidig som disse byggene hadde forbedre gulv på grunne som er en stor kostnadspost. Hadde disse byggene hatt optimaliserte ventilasjonsverdier ville energikostnads posten vært lavere og kanskje hadde levert bedre resultater end optimaliserte scenarier i denne forskningen.

I sum vil en slik optimalisering være meget nyttig med tanke på energisløsing i byggsektoren og vil belaste samfunnet over ca. 50% mindre enn eldre bygg, og ruste bygget bedre mot kommende strenge energikrav i fremtiden.

## 6 Forslag til videre arbeid

Da denne forskningen hadde begrenset med tid, er ikke funnene av forsøket ikke komplette. Dermed bør videre arbeid til denne problemstillingen ta for seg følgende:

- Optimalisere ventilasjonsparametere i et bygg med CAV anlegge, sammen med klimaskjermen.
- Foreta en multi-objektiv forskning der både energi og kostnader tas hensyn til og minimeres.
- Se på temperaturendringer vertikalt i rommet når scenario med ventilasjonsvarme vurderes. Her kan temperaturen i settes som begrensning i grafiske skriptet. Dette vil CFD-tilleggspakken i IDA ICE være nyttig for.
- IDA ICE kan også beregne belysingskrav, dermed bør også dette kravet tas inn i komfortkrav som bygget skal tilfredsstillere.
- Sette en maksimal grense til investeringskostnader satt av til renovering. Dette sette som krav i det grafiske skriptet. Her vil det for eksempel være interessant å sette av en prosentvis andel av operativkostnader til renoveringen.
- Det er også meget interessant å finne ut av livssyklusanalyse (LCA) av bygget.

## Litteraturliste

- [1] Energifakta Norge, «Energifakta Norge,» 03 01 2019. [Internett]. Available: <https://energifaktanorge.no/norsk-energibruk/energibruken-i-ulike-sektorer/>. [Funnet 16 04 2019].
- [2] EU Commission, "EU Commission," EU Commission, 2019. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>. [Accessed 02 04 2019].
- [3] D. C. Kalaitzakis K, «Decision Support Methodologies on The Energy,» Earth Scan, 2009.
- [4] A. S. SOLMAZ, «An Approach to Identify the Optimal Solutions in the Context,» MEGARON, Izmir, 2016.
- [5] M. Krarti, «Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings,» 2011.
- [6] H. Lahmidi, «Development of a Multicriteria Tool for Optimizing the Renovation,» Applied Energi, 2010.
- [7] E. Asadi, «A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB,» 2012.
- [8] H. H. Griet Verbeeck, "Life Cycle Optimization of Extremely Low Energy Dwellings," 2007.
- [9] M. H. A. Hasan, "Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings," 2011.

- [10] O. T. Karaguzel, «Coupling of whole-building energy simulation and multi-dimensional numerical optimization for minimizing the life cycle costs of office buildings,» 2014.
- [11] Direktoratet for byggkvalitet, «Veiledning om tekniske krav til byggverk,» 14 06 2018. [Internett]. Available: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>. [Funnet 02 05 2019].
- [12] Lovdata, «Lovdata,» 01 07 2017. [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840>. [Funnet 02 05 2019].
- [13] Standard Norge, «Norsk Standard,» 06 03 2019. [Internett]. Available: [https://www.standard.no/nyheter/nyhetsarkiv/bygg-anlegg-og-eiendom/2014/ny-utgave-av-energiberegningsstandarden-ns-3031/?gclid=EAIaIQobChMIxJmUyqO02gIVWy0ZCh3dqQJKEAAYASAAEgKMWfD\\_BwE](https://www.standard.no/nyheter/nyhetsarkiv/bygg-anlegg-og-eiendom/2014/ny-utgave-av-energiberegningsstandarden-ns-3031/?gclid=EAIaIQobChMIxJmUyqO02gIVWy0ZCh3dqQJKEAAYASAAEgKMWfD_BwE). [Funnet 18 04 2019].
- [14] Norsk Standard, «Norsk Standard,» 10 03 2016. [Internett]. Available: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/passivhus/>. [Funnet 18 05 2019].
- [15] Store Norske Leksikon, «SNL,» 20 04 2016. [Internett]. Available: [https://snl.no/klima\\_i\\_Norge](https://snl.no/klima_i_Norge). [Funnet 18 05 2019].
- [16] ASHRAE, "ashrae.org," 2019. [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/weather-data-center>. [Accessed 18 02 2019].
- [17] D. B. Crawley, «Performance, Contrasting the capabilities of building energy,» Science Direct, 2008.
- [18] EQUA Simulation AB, "Equa Online," 2018. [Online]. Available: <http://www.equaonline.com/iceuser/pdf/ICE47GettingStartedEng.pdf>. [Accessed 18 01 2019].

- [19] EQUA Simulation AB, EQUA Simulation AB, 2013. [Online]. Available: [www.equaonline.com/ice4user/new\\_index.html](http://www.equaonline.com/ice4user/new_index.html). [Accessed 08 02 2019].
- [20] B. M. Behrendt, «A SYSTEM FOR THE COMPARISON OF TOOLS FOR THE SIMULATION OF,» Technical University of Denmark, Copenhagen, 2011.
- [21] S. A. Klein, «TRNSYS, a TRaNsient S Ystem Simulation program,» 2006. [Internett]. Available: <http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/01-GettingStarted.pdf>. [Funnet 01 05 2019].
- [22] A. Andia, Post-Parametric Automation in Design and Construction, Artech House, 2014, p. 230.
- [23] M. Wetter, «<https://simulationresearch.lbl.gov/>,» 08 12 2011. [Internett]. Available: <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/download/manual-3-1-0.pdf>. [Funnet 04 03 2019].
- [24] T. H. Løvbak, «Statistisk sentralbyrå,» Statistisk sentralbyrå, 20 02 2019. [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/statbank/table/03158/>. [Funnet 28 02 2019].
- [25] Statistisk Sentralbyrå, «Statistisk Sentralbyrå,» 12 2018. [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/statbank/table/05940/>. [Funnet 14 03 2019].
- [26] A. G. L. o. T. H. D. Marit Thyholt, «Kartlegging av mekanisk kjøling i nye kontor- og forretningsbygg,» SINTEF Bygg og miljø, 2001.
- [27] E. Simulation, «EQUA Simulation AB,» EQUA, 2018.
- [28] «Betongelement Boka,» Betongelement Foreningen, 2008. [Internett]. Available: [http://betongelementboka.betongelement.no/betongapp/BookE.asp?isSearch=0&liID=34&DocumentId=BindE/Del\\_1/E3/3\\_4\\_U\\_verdi\\_for\\_etasjeskiller.pdf&BookId=E](http://betongelementboka.betongelement.no/betongapp/BookE.asp?isSearch=0&liID=34&DocumentId=BindE/Del_1/E3/3_4_U_verdi_for_etasjeskiller.pdf&BookId=E). [Funnet 24 02 2019].

- [29] Max Sievert AS, «maxsievert.no,» Max Sievert AS, 2018. [Internett]. Available: <https://maxsievert.no/guide-for-komfortnivamaling-pa-arbeidsplassen>. [Funnet 25 03 2019].
- [30] Enova, 12 2012. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/4046/u-verdier\\_vegger\\_over\\_terreng\\_med\\_bindingsverk\\_av\\_tre\\_med\\_kontinuerlig\\_utvendig\\_i\\_solasjon](https://www.byggforsk.no/dokument/4046/u-verdier_vegger_over_terreng_med_bindingsverk_av_tre_med_kontinuerlig_utvendig_i_solasjon). [Funnet 06 03 2019].
- [31] SINTEF, «Byggforsk,» SINTEF Byggforsk, 2003. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/212/471013\\_u-verdier\\_tak](https://www.byggforsk.no/dokument/212/471013_u-verdier_tak). [Funnet 05 03 2019].
- [32] SINTEF, «Byggforsk,» SINTEF Byggforsk, 06 2012. [Internett]. Available: [https://www.byggforsk.no/dokument/328/golv\\_paa\\_grunnen\\_med\\_ringmur\\_utfoerelse](https://www.byggforsk.no/dokument/328/golv_paa_grunnen_med_ringmur_utfoerelse). [Funnet 06 03 2019].
- [33] Pilkington, «Pilkington,» NSG Goup, 2018. [Internett]. Available: <https://www.pilkington.com/nb-no/no/arkitekter/glassfakta-2018>. [Funnet 06 03 2019].
- [34] D. Solar, «Dickson Solar Protection,» DICKSON-CONSTANT, 2018. [Internett]. Available: <http://documents.dickson-constant.com/en/UK/solar-protection/sunworker>. [Funnet 06 03 2019].
- [35] O. T. Karaguzel, "Coupling of whole-building energy simulation and multi-dimensional," Pittsburgh, 2013.
- [36] Ø. B. S. N. Ida Bryn, «Merkostnader for energieffektive bygg,» Kommunal- og moderniseringsdepartementet Direktoratet for byggkvalitet, Oslo, 2015.
- [37] A. Hasan, «Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation,» ELLSEVIER, 2007.

[38] Statistisk sentralbyrå, «SSB,» 12 04 2019. [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/elkraftpris>. [Funnet 18 04 2019].

[39] "An Approach for Making Optimal Decisions in Building Energy Efficiency Retrofit Projects," Indoor and Built Environment, 2018.

# Vedlegg

## A

The image displays four screenshots of a software interface for configuring schedules. Each window shows a name field, a graph for Monday-Friday, Saturday, and Sunday & holidays, and a set of control buttons.

- Top Left:** Schedule window for "06-18 Occupancy ny". The Monday-Friday graph shows a value of 0.6 from 6:00 to 18:00. Saturday and Sunday & holidays are set to 0.0. "Same as Saturday" is checked.
- Top Right:** Schedule window for "CAV Schedule - Sekundær areal 0.7 l/s". The Monday-Friday graph shows a value of 0.7 from 6:00 to 18:00. Saturday and Sunday & holidays are set to 0.2. "Same as Saturday" is checked.
- Bottom Left:** Schedule window for "06-18 Lighting ny". The Monday-Friday graph shows a value of 1.0 from 6:00 to 18:00. Saturday and Sunday & holidays are set to 0.0. "Same as Saturday" is checked.
- Bottom Right:** Schedule window for "CAV Schedule - Primær areal 1.1814 l/s". It includes a "Rules" list with "Weekends & Holidays: 0.2", "from 15 Apr to 15 Sep Workdays: Profile = Primary CAV 1.1814 and summer", and "All days: Profile = Primary CAV 1.1814 l/s". A "Data for selected rule" graph shows a value of 4.0 from 6:00 to 18:00. "Valid days" are Mon, Wed, Fri, Tue, Thu. Start date is 04-15 and end date is 09-15. "Rule description" is "rule-3".



## B

<b>Yttervegg</b>					
<b>Isolasjonstykkelse</b>	U-verdi	Kostnad/m2 (kr)	Post i Norsk Prisbok	Kostnad/m2 riving (NOK)	Areal yttervegg m2
200 mm	0,22	0	02.3.D.03	0	825
250 mm	0,2	1272	02.3.D.04	493,944	
300 mm	0,17	1394	02.3.D.05	543,152	
350 mm	0,15	1451	02.3.D.06	583,456	
400 mm	0,13	1652	02.3.D.06	676,408	
450 mm	0,12	1832	02.3.D.07	772,312	
Tak					Areal tak m2
<b>Isolasjonstykkelse</b>	U-verdi	Kostnad/m2 (kr)	Post i Norsk Prisbok	Kostnad/m2 riving (NOK)	974
200 mm	0,18	0	02.6.A.022	0	
230 mm	0,16	798	02.6.A.024	379	
300 mm	0,13	884	02.6.A.025	410	
400 mm	0,1	1008	02.6.A.027	548	
500 mm	0,08	1126	02.6.A.028	623	
Gulv på grunn					
<b>Isolasjonstykkelse</b>	U-verdi	Kostnad/m2 inkludert riving (NOK)	Post i Norsk Prisbok		Areal gulv m2
200 mm	0,18	955	02.5.A.004		992
250 mm	0,16	1057	02.5.A.005		
300 mm	0,13	1091	02.5.A.009		
350 mm	0,1	1193	02.5.A.006		
400 mm	0,8	1227	02.5.A.010		
Vinduer	Pris/m2 (NOK)	Pris etter 20 år (NOK)	Pris etter 40 år (NOK)		Areal vindu m2
U-verdi =1,6	0	800,84	206,95		331
U-verdi =1,4	3285,5	849,04	219,41		
U-verdi =1,2	3472	897,23	231,86		
U-verdi =1,0	3749,5	968,94	250,39		
U-verdi =0,8	4027	1040,65	268,92		
Solavskjerming	Farge	Pris/m2 (NOK)	Post i Norsk Prisbok		Areal screen m2
Sunworker M391	Svart	1751	02.7.A.014		367,3
Sunworker M393	Bronse	1751	02.7.A.014		
Sunworker M654	Grå	1751	02.7.A.014		
<b>CAV til DCV</b>	<b>NOK/m<sup>2</sup>BRA</b>				
	140				



# D



# Vedlegg E

## E.1

Solar Factor	Solar transmission	Solar reflection	Solar absorption
0.13	0.14	0.47	0.39

### CALCULATE ENERGY INTAKE

Your glazing ?

Glazing C ▾

The glazing's U value

The glazing's G value

Fabric reference



Sunworker M654 Grey

Energy transmission

0.14

Energy absorption

0.39

Energy reflection

0.47

Energy intake ?

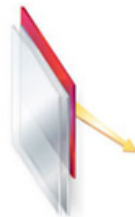


59 %

Gtot : 0.59

Class 0

In the winter, your glazing alone admits **59 %** of the solar heat to heat your interior.

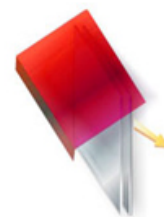


42 %

Indoor Gtot : 0.42

Class 0

In the summer, your glazing and indoor solar protection block **58 %** of the solar heat.



13 %

Outdoor Gtot : 0.13

Class 2

In the summer, your glazing and outdoor solar protection block **87 %** of the solar heat.

## E.2

Solar Factor	Solar transmission	Solar reflection	Solar absorption
0.12	0.06	0.05	0.89

### CALCULATE ENERGY INTAKE

Your glazing ?

Glazing C ▾

The glazing's U value

The glazing's G value

Fabric reference



Sunworker M391 Black

Energy transmission

0.06

Energy absorption

0.89

Energy reflection

0.05

Energy intake ?

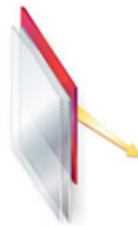


59 %

Gtot : 0.59

Class 0

In the winter, your glazing alone admits **59%** of the solar heat to heat your interior.



55 %

Indoor Gtot : 0.55

Class 0

In the summer, your glazing and indoor solar protection block **45%** of the solar heat.



12 %

Outdoor Gtot : 0.12

Class 2

In the summer, your glazing and outdoor solar protection block **88%** of the solar heat.

### E.3

Solar Factor	Solar transmission	Solar reflection	Solar absorption
0.12	0.07	0.08	0.85

## CALCULATE ENERGY INTAKE

### Your glazing ?

Glazing C ▾

The glazing's U value

The glazing's G value

### Fabric reference



Sunworker M393 Bronze  
Energy transmission 0.07  
Energy absorption 0.85  
Energy reflection 0.08

### Energy intake ?

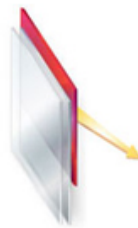


59 %

Gtot : 0.59

Class 0

In the winter, your glazing alone admits **59%** of the solar heat to heat your interior.

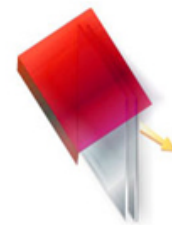


54 %

Indoor Gtot : 0.54

Class 0

In the summer, your glazing and indoor solar protection block **46%** of the solar heat.



12 %

Outdoor Gtot : 0.12

Class 2

In the summer, your glazing and outdoor solar protection block **88%** of the solar heat.