

Muligheter for bedre inn klima og lav energibruk i bygninger med doble fasader

Silje Tangen

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Natasa Nord, EPT

Medveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosesseteknikk

EPT-M-2014- 94

MASTEROPPGAVE

for

Student Silje Tangen

Våren 2015

Muligheter for bedre inneklima og lav energibruk i bygninger med doble fasader

*Possibilities for better indoor environment and low energy use in buildings with double facades***Bakgrunn og målsetting**

Doble fasader har vært i bruk i noen tiår, og er også en alternativ fasadeløsning i Norge. En dobbelfasade består i hovedsak av en ytre og en indre fasade med ett hulrom imellom. Hulrommet kan være ventilert og inneholde solskjerming. Ved riktig bruk kan doble fasader blant annet redusere energibehovet til oppvarming og kjøling. En utfordring med doble fasader er at det er vanskelig å simulere energibruk og inneklima ved hjelp av «standard» bygningssimuleringsverktøy. Hensikten med oppgaven er å undersøke muligheter og begrensninger ved modellering av doble fasader i det avanserte bygningssimuleringsverktøyet IDA-ICE, samt å utføre simuleringer av inneklima og energibruk. IDA-ICE modellene skal benyttes for å analysere inneklima og energibruk. På basis av det skal studenten foreslå en simuleringsmetodikk som kan benyttes for å simulere doble fasader på en god og enkel måte. Studenten skal foreslå tiltak og presentere relevante energiytelser som kan fremme bruk av doble fasader i bygninger. I løpet av prosjektoppgave samlet kandidaten informasjon fra to eksisterende byggeprosjekter i COWI. Resultater fra dem skal benyttes i masteroppgaven for å utvikle en generell bygningsmodell som skal benyttes for å teste den foreslåtte simuleringsmetodikken.

Mål

Hensikten med oppgaven er å foreslå en simuleringsmetodikk som kan benyttes for å simulere doble fasader på en god og enkel måte. Analysere inneklima og energiytelser ved bruk av doble fasader skal også presenteres.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Litteraturstudium av doble fasader generelt og bruk av doble fasader i Norge. Litteraturstudiet skal inkludere oversikt over tekniske og praktiske forutsetninger.
2. På basis av relevante prosjekter hos COWI definere en generell simuleringsmodell av bygning. Kontor- eller forretningsbygning kan være relevante.
3. Definer og forklar metodikken for simulering av doble fasader i IDA-ICE. Diskuter utfordringer og svakheter ved den foreslåtte metodikken. Diskutere hvilke informasjon er kritisk for modellering av doblefasader.
4. Utprøve metodikken ved å simulere bygningen med doble fasader i IDA-ICE. Gjennomføre følsomhets analyse av modellen. I analysen ta hensikt til kritiske parametere som kan ha betydelig utslag på energiytelser og inneklima resultater.

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sendte instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesseteknikk.

Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, instituttnavn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningsmeknikk, varmeteknikk)
 Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosesseteknikk, 14. januar 2014



Olav Bolland
Instituttleder



Natasa Nord
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder(e):

Hans Martin Mathisen, professor ved EPT, hans.m.mathisen@ntnu.no

Thomas Haavi, COWI, mob. 98 23 04 42, toha@cowi.no

Forord

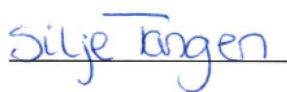
Denne masteroppgaven ble fullført våren 2015 ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet ved Institutt for Energi- og prosesssteknikk.

Oppgavens tema er utarbeidet av COWI Norge AS, NTNU og meg selv. Hensikten er å foreslå en simuleringsmetodikk som kan benyttes for å simulere doble fasader i simuleringsprogrammet IDA ICE på en god og enkel måte. Deretter skal det jobbes videre med de mest aktuelle parameterne for økt energieffektivisering og forbedring av inneklima.

Jeg vil spesielt takke min veileder Natasa Nord, førsteamanuensis ved Institutt for Energi- og prosesssteknikk, for faglig veiledning, støtte og gode råd gjennom dette arbeidet. En takk til medveiledere Thomas Haavi og Anne Kristine Amble i COWI for deling av informasjon om kontorbygg og nyttige råd under utarbeidelsen av oppgaven, samt veiledning om bruk av doble fasader. Jeg vil også gi en ekstra takk til Arnkell J. Petersen som i løpet av denne perioden har gitt god veiledning og svart på de mange spørsmålene som jeg har hatt angående IDA ICE og doble fasader.

En stor takk til familie og venner for støtte om oppmuntrende ord gjennom denne spennende perioden.

Trondheim, 7. juni 2015



Silje Tangen

Sammendrag

Doble fasader er lite utbredt i Norge i dag, men ønsket om energieffektive bygninger og et godt innemiljø gjør at nye bygningskonstruksjoner stadig er i utvikling. En dobbelfasade består av en ytre og en indre fasade med et hulrom imellom. Den ytre fasaden består av glass og er lagt utenpå den opprinnelige fasaden. Glass har langt dårligere egenskaper enn veggkonstruksjoner når det gjelder varmetransmisjon og er derfor en viktig og kritisk del av prosjekteringen. Målet med denne oppgaven er å foreslå en simuleringsmetodikk som kan benyttes for å simulere doble fasader på en god og enkel måte. Den valgte simuleringsmetodikken gikk ut på å simulere de mest kritiske parameterne som ble funnet i litteraturen. Deretter ble simuleringsmetodikken prøvd ut på referansebygget for å se om innemiljøet i bygningen kunne forbedres samtidig som energibruket ble redusert ved å bruke doble fasader. Referansebygget som ble benyttet som beregningsgrunnlag i denne oppgaven er et kontorbygg som er basert på statistiske data, bygd etter passivhusstandarden og er plassert i Oslo. Videre ble de endringene i referansebygget som gav de beste resultatene, med hensyn på energibruk og termisk komfort, brukt til å lage en modell med en forbedret dobbelfasade. De ulike scenarioene ble evaluert og simulert i det dynamiske simuleringsverktøyet IDA Indoor Climate and Energy 4.6.1.

Ved sammenligning av referansebygget med og uten den doble fasaden men med nesten lik U-verdi, viser resultatene at referansebygget med den doble fasaden vil oppnå bedre inneklima enn med en enkeltfasade. Selv om det totale energibehovet ikke ble endret drastisk, viste simuleringen at kjølebehovet i referansebygget med den doble fasaden var omtrent 22 % lavere sammenlignet med en enkeltfasade med omtrent samme U-verdi. Den doble fasaden reduserte den operative temperaturen på varme dager og bedret dermed PPD-nivået. Resultatene fra simuleringene med referansebygget viser også klart at den ekstra glassfasaden, ved bruk av dobbelfasade, vil redusere dagslyset i sonene innenfor. I simuleringene fra referansebygget ble de gjennomsnittlige dagslysforholdene gjennom året redusert med omtrent 40 %, for sonen vendt mot sør, sammenlignet med en enkeltfasade.

Det ble observert at U-verdien på glassene og antall glass i indre og ytre fasade hadde betydning for inneklima og energibruk. Ved dårlig U-verdi, ble den operative temperaturen på dager med mye solstråling veldig høy i sonene. Oppbyggingen av den doble fasaden med tre-lags glass innerst og ett-lags glass ytterst, med en U-verdi på til sammen 0,7 W/m²K, reduserte energibehovet med 16 % sammenlignet med referansebygget. Ved implementering av mellomliggende eller utvendig solavskjermingssystem ble kjølebehovet i bygget redusert med henholdsvis 64 % og 75 % sammenlignet med referansebygget uten solavskjerming. Ved bruk av åpent hulrom vil ikke temperaturen i dobbelfasaden endres i like stor grad som med et lukket hulrom. For modellen med den forbedrede løsningen på dobbelfasaden var det gjennomsnittlig varmebehovet redusert med omtrent 9 %, de fire første månedene i året dersom hulrommet var lukket, sammenlignet med en åpning på 5 % av glassarealet. Størrelsen på åpningene og dybden på hulrommet hadde betydning for volumstrømmen gjennom den doble fasaden og hvor mye varme som ble transportert bort. Det kan konkluderes med at den operative temperaturen i sonene blir påvirket av temperaturen som oppstår i hulrommet, da varme fra hulrommet ble overført til sonene bak den doble fasaden.

Til slutt kan det konkluderes med at riktig valg av klimafil for simuleringsprogrammet er viktig for å finne korrekt energibehov. Resultatene fra simuleringene med forskjellige klimafil for samme plass viser at bygget varierte energibehovet etter hvilken klimafil den ble simulert med. På det meste gav det spesifikke energibehovet en forskjell på nesten 10 % ved to ulike klimafil-simuleringer for samme bygg. I tillegg viste det seg at ved endringer i klimafil så er det endring i temperaturparameteren som spiller størst rolle for energibehovet og inneklimaet i bygget. En økning på 20 % i temperaturen gav en økning i energibehovet på omtrent 15 % for modellen med den forbedrede dobbelfasaden.

Abstract

Double-skin facades are not so very common in Norway today. A development in new building structure is a result of the desire to reach energy-efficient buildings and a good indoor environment. The term double-skin facade refers to an arrangement with a glass facade in front of the actual building structure. Glass has far worse properties than the wall constructions in terms of heat transmission and are therefore an important and critical part of the design. The aim of this project is to propose a simulation methodology that can be used to simulate double-skin facades in a good and simple way. The selected simulation methodology involves simulating the most critical parameters that were found in the literature. The methodology was tested on the reference building to see if the indoor climate of the building can be improved while the energy consumption is reduced. The calculations made in this report are based on an office as the reference building that is found from statistical data, built to passive house standard, and is located in Oslo. Further, the changes in the reference building that gave the best results in terms of energy use and thermal comfort were used to create a model with an improved double-skin facade. The different scenarios were evaluated and simulated in the dynamic simulation tool IDA Indoor Climate and Energy 4.6.1.

The results show that the reference building with the double-skin facade will be able to improve the indoor climate, compared with the reference building without the outer facade but with the same U-value of the windows. The simulation showed that the reference building with the double-skin facade had a cooling demand that was approximately 22 % lower compared with a traditionally facade with the same U-value. The double-skin facade reduced the operational temperature on hot days and therefore improved the PPD level. The results of the simulations also clearly shows that the extra glass facade, for the double-skin facade, will reduce the daylight in the zones. The simulations made between the reference building and the single facade illustrates that the average daylight conditions over the year led to a reduction in about 40 % in a zone facing south.

It was observed that the U-value of the glasses and the number of panes in interior and exterior facade had an impact on the indoor air quality and the energy demand. With a higher U-value the operational temperature on days with a lot of solar radiation was very high in the zones. The structure of the double skin facade with three-layer glass in the interior facade and a single glass in the external facade, with a U-value of a total 0,7 W/m²K, reduced the energy demand by 16 % compared to the reference building. By an implementation of intermediate or exterior shading, the cooling demand in the building was decreased by 64 % and 75 % compared to the reference building without solar shading. With an open cavity, the temperature in the double-skin facade will not change to the same extent compared to a closed cavity. For the model with improved double-skin facade, the average heat demand was decreased by approximately 9 % over the first four months of the year if the cavity was closed compared to an opening of 5 % of the glass facade. The size and depth of the cavity had significance for the airflow through the double-skin facade and the amount of heat transported out of the cavity. It can be concluded that the temperature appearing in the cavity affects the operational temperature in the zones.

Finally, it can be concluded that the right choice of climate file for the simulation program is important to get the correct energy demand. The result from the simulations with different files for the same locations showed that the building varied in energy needs after which climate file it was simulated with. The specific energy demand gave a difference of almost 10 % for two different climate file simulations for the same building. In addition, it turned out that the temperature parameter affected the energy demand and indoor climate in the building the most, if the parameters are changing in the climate file. A 20 % rise in the outdoor temperature resulted in an increase in energy demand of about 15 % for the model with the improved double-skin facade.

Liste over figurer

Figur 1: Årlig energibehov ved bruk av TEK 10 og passivhusstandard (BoligEnøk).....	3
Figur 2: Systemgrenser for energiberegning (Høseggen, 2008).....	5
Figur 3: Varmebehov for bygningskategorien "Kontorbygg" med oppvarmet gulvareal fra 500-1000m ²	6
Figur 4: Spesifikk tilført energi til ulike bygningstyper, temp.- og stedskorrigert (Enova, 2011).....	7
Figur 5: Energibruk for cellekontor ved ulike vindusarealer (Erichsen & Horgen AS, 2007).....	8
Figur 6: Gjennomsnittlig (2004, 2006, 2009 og 2012) spesifikk energibruk [kWh/m ²] for boliger etter region (SSB, 2013).	9
Figur 7: Kart over Norge, med plassering av Tromsø, Andøya, Bergen og Oslo	12
Figur 8: Gjennomsnittlig temperatur for ulike klimafilere, IWEC, Meteo og DRY, for Bergen.....	13
Figur 9: Gjennomsnittlig direkte solfluks for ulike klimafilere, IWEC, Meteo og DRY, for Bergen.....	13
Figur 10: Solinnstråling mot horisontal flate i januar og juli (Fornøybar, 2007)	14
Figur 11: Månedlig solinnstråling i Oslo, Bergen og Tromsø simulert mot sør med optimisert vinkel (34grader) (European commission and J.R.C, 2012).....	15
Figur 12: Oppbygging av dobbelfasader (Oesterle, 2001).....	17
Figur 13: Termisk oppdrift i hulrommet med to åpninger (Kleiven, 2003)	20
Figur 14: Ventilasjonsprinsipp for doble fasader (Haase ¹ et al., 2007).	22
Figur 15: Fordeling av den samlede strålingen mot en overflate	25
Figur 16: Tverrsnitt av et rom med dobbelfasade som viser involverte varmeoverføringer (Høseggen et al., 2008).....	25
Figur 17: Ettlagsrute og tolagsrute av vanlig klart glass. Fordeling av solstråling (Statens byggeforskningsinstitutt, 2006).....	26
Figur 18: Solinnstråling og varmfordeling gjennom en dobbelfasade(Haase, 2011)	28
Figur 19: Solinnstråling gjennom et to-lags vindu, g-verdi.....	29
Figur 20: Målte g-verdier for utvendig, mellomliggende og innvendig plassering av solavskjermingssystemet med persienner (Wall and Bülow-Hübe, 2003).....	30
Figur 21: Glassegenskaper som påvirker temperatur, dagslys og energibruk i rom (Erichsen & Horgen AS, 2007).....	30
Figur 22: Relativ ytelse vs. operativ temperatur (Seppänen, 2006).....	32
Figur 23: Prinsipper for dobbelfasade (Andresen, 2002, Haase and Wigénstad, 2010, Oesterle, 2001)	38
Figur 24: Scenarier for referansebygget.....	45
Figur 25: Areal i fullførte kontorbygg 2000-2013 (SSB, 2014).....	48
Figur 26: Sammenhengen mellom byggeår og bygningers areal for bygninger med og uten kjøleanlegg (Thyholt et al., 2001)	49
Figur 27: Kontorbyggets oppbygging.....	49
Figur 28: Planløsningen til kontorbygget	50
Figur 29: Energibruk for kontorbygg etter byggeår samt TEK 10 og passivhusstandarden (SSB, 2011).....	51
Figur 30: Oppbyggingen av kontorbygget i IDA ICE.....	52
Figur 31: Direkte og diffus solinnstråling med DRY-klima for Oslo	53
Figur 32: Tørr-kuletemperatur med DRY-klima for Oslo	53
Figur 33: Soneinndeling i IDA ICE, sju soner.....	54
Figur 34: Soneinndeling i IDA ICE, fire soner	54
Figur 35: Oppbyggingen av ventilasjonssystemet i IDA ICE	58
Figur 36: Prinsipiell oppbygging av den doble fasaden i IDA ICE	60

Figur 37: Temperaturen ved åpningen i øvre del av hulrommet i den doble fasaden for Sone 1 og Sone 2	60
Figur 38: Valgt planløsning for referansebygget	63
Figur 39: Månedlig energibehov for referansebygget	63
Figur 40: Maks operativ temperatur for referansebygget [°C]	64
Figur 41: Maksimum solvarme i de ulike sonene [W/m ²]	65
Figur 42: Gjennomsnittlig operativ temperatur for sonene i referansebygget	65
Figur 43: Spesifikt energibehov for referansebygget med og uten dobbelfasade	67
Figur 44: Gjennomsnittlig operativ temperatur og dagslys (ved første kontorpult) både med og uten dobbelfasade i Sone 1	68
Figur 45: Energiforbruk for referansebygget og maks operativ temperatur i Sone 1, med- og uten dobbelfasade	69
Figur 46: PPD-verdi og operativ temperatur den dagen med flest misfornøyde 13/8-2015, for Scenario 0-1 og 0-2, Sone 1	69
Figur 47: Spesifikt energibehov for Scenario 1 ved ulik U-verdi, g-verdi og transmittans	71
Figur 48: Dagslys i Sone 1 ved første kontorpult for Scenario 1	72
Figur 49: Gjennomsnittlig operativ temperatur per måned for referansebygget og scenario 1	73
Figur 50: Spesifikt kjølebehov for Scenario 2 og 3	74
Figur 51: Spesifikt varmebehov for Scenario 2 og 3	74
Figur 52: Totalt energibehov for Scenario 2 og 3	75
Figur 53: Gjennomsnittlig temperatur i hulrommet i den doble fasaden i Sone 1 og gjennomsnittlig direkte solstråling, hulrommets bredde 0,6 m med varierende åpningsareal	76
Figur 54: Gjennomsnittlig operativ temperatur i Sone 1, ved hulrommets bredde på 0,6 m og varierende åpningsareal	77
Figur 55: Volumstrøm i den doble fasaden i Sone 1 mot sør, og Sone 4 mot nord	77
Figur 56: Volumstrømmen og temperatur i hulrommet ved bredde 0,6 m og ulik åpningsareal samt utetemperatur (11/3-2015)	78
Figur 57: Gjennomsnittlig volumstrøm og temperatur per år i hulrommet	79
Figur 58: Gjennomsnittlig luftveksling per time per år i dobbelfasaden mot sør ved ulik dybde og åpningsareal	80
Figur 59: Spesifikt energibehov, Scenario 4, plassering av solavskjermingssystem	81
Figur 60: Dagslys i Sone 1 ved første kontorpult for Scenario 4	82
Figur 61: Månedlig gjennomsnittlig operativ temperatur og PPD for Scenario 4, Sone 1	83
Figur 62: Oversikt over spesifikt energibruk for de ulike scenarioene	84
Figur 63: Termisk komfort i under oppholdstid for de ulike scenarioene	85
Figur 64: Scenarioene som gav størst endring i energibruk og termisk komfort	86
Figur 65: Energiforbruk for referansebygget sammenlignet med den beste løsningen for dobbelfasaden	88
Figur 66: Månedlig energibehov for referansebygget med beste løsning på den doble fasaden	89
Figur 67: Sommersituasjon 16/6-1015, sammenheng mellom temperaturer og volumstrøm i hulrommet	89
Figur 68: Prosentvis operativ temperatur av total driftstid i Sone 1	90
Figur 69: Forholdet mellom innnetemperatur i Sone 1 og utetemperatur	91
Figur 70: Gjennomsnittlig operativ temperatur og gjennomsnittlig PPD i Sone 1	92
Figur 71: Årlig total energibehov og gjennomsnittlig temperatur i den doble fasaden ved økende vindusareal	93
Figur 72: Varmebehov og gjennomsnittlig operativ temperatur i Sone 1, ved økende vindusareal	93
Figur 73: Kjølebehov og årlig gjennomsnittlig PPD i Sone 1, ved økende vindusareal	94

Figur 74: Dagslys ved første kontorpult ved vinduet i Sone 1 ved økende vindusareal	95
Figur 75: Maks operativ temperatur og antall timer med uakseptabel termisk komfort i Sone 1 ved økende vindusareal	96
Figur 76: Årlig total energibehov og gjennomsnittlig temperatur for ulike åpningsareal mellom hulrommet og omgivelsene	97
Figur 77: Spesifikt varmebehov og årlig gjennomsnittlig operativ temperatur for ulike åpningsareal mellom hulrommet og omgivelsene	98
Figur 78: Årlig kjølebehov samt gjennomsnittlig PPD i Sone 1 for ulike åpningsareal mellom hulrommet og omgivelsene.....	98
Figur 79: Maks operativ temperatur og antall timer med uakseptabel termisk komfort i Sone 1 for ulike åpningsstørrelser	99
Figur 80: Varmebehov for kontorbygget med den beste løsningen på dobbelfasaden med åpent og lukket hulrommet i de første vintermånedene i året	100
Figur 81: Temperatur i hulrommet og solinnstråling de fire første månedene i året med åpent og lukket hulrom	101
Figur 82: Operativ temperatur i Sone 1 for de fire første månedene i året.....	102
Figur 83: Gjennomsnittlig operativ temperatur og PPD i Sone 1	102
Figur 84: Energiforbruk og temperatur i den doble fasaden ved ulike plassering av solavskjermingssystemet.....	103
Figur 85: Varmebehov og årlig gjennomsnittlig temperatur i Sone 1 ved ulike plassering av solavskjermingssystemet.....	104
Figur 86: Kjølebehov og årlig gjennomsnittlig PPD i Sone 1 ved ulike plassering av solavskjermingssystemet.....	104
Figur 87: Maks operativ temperatur og antall timer med uakseptabel termisk komfort i Sone 1 ved ulike plassering av solavskjermingssystemet	105
Figur 88: Energiforbruk for bygget med markering for endring i U-verdi på det innerste glasset i den doble fasaden på $\pm 20\%$	107
Figur 89: Antall timer med uakseptabel termisk komfort ved ulike endringer i dobbelfasaden for følsomhetsanalysen.....	108
Figur 90: Maks operativ temperatur for de ulike endringene i følsomhetsanalysen.....	108
Figur 91: Månedlig energiforbruk og gjennomsnittlig utetemperatur for den beste løsningen med forskjellig klimadata, DRY, IWEC og IWEC2	109
Figur 92: Gjennomsnittlig direkte solstråling for de forskjellige klimadataene, DRY, IWEC og IWEC2.....	110
Figur 93: Temperaturdifferanse for de ulike klimafilene for Oslo	111
Figur 94: Energiforbruket ved endringer på $\pm 20\%$ i referansebygget og den beste løsningen på dobbelfasaden.....	112
Figur 95: Temperaturdifferanse med endring i utetemperatur på $\pm 20\%$	113
Figur 96: Gjennomsnittlig operativ temperatur i Sone 1, ved endring av temperaturen $\pm 20\%$ i klimafilene	113
Figur 97: Termisk komfort i Sone 1, ved endring av temperatur $\pm 20\%$ i DRY-klimafilene	114

Liste over tabeller

Tabell 1: Krav til enkeltverdier for TEK 10 og passivhusstandard	4
Tabell 2: Anbefalt operativ temperatur, TEK 10.....	32
Tabell 3: Termisk tilstand for hele bygningen, anbefalte områder for PPD-verdier	33
Tabell 4: Fordeler og ulemper ved bruk av doble fasader	39
Tabell 5: Simulerte areal, referansebygg.....	54
Tabell 6: Energiramme for referansebygget	55
Tabell 7: U-verdi, normalisert kuldebroverdi og infiltrasjon med passivhusstandarden NS 3701.	55
Tabell 8: Varmetilskudd - standardverdier i driftstiden NS 3701.....	56
Tabell 9: Driftstid for referansebygget, kontorbygg, etter NS 3031	57
Tabell 10: Tilstedeværelse personer i kontorbygget.....	57
Tabell 11: Systemtap for varmedistribusjonssystemet	57
Tabell 12: Kriterier for den doble fasaden til referansebygget.....	61
Tabell 13: Dimensjonerende varme- og kjøleeffekt for sonene i referansebygget	62
Tabell 14: Innendørstemperaturer og CO ₂ -nivå til referansebygningen.....	66
Tabell 15: U-verdi, g-verdi samt transmittans til fasaden både med og uten dobbelfasade.....	66
Tabell 16: Termisk komfort, Sone 1.....	68
Tabell 17: De ulike scenarioene som skal gjennomføres for den doble fasaden.....	70
Tabell 18: U-verdi, g-verdi og transmittans for oppbyggingen av de ulike scenariene i den doble fasaden	71
Tabell 19: Termisk komfort Scenario 1, Sone 1.....	73
Tabell 20: Beregnet volumstrøm mot resultatet i IDA ICE	78
Tabell 21: Termisk komfort for Scenario 2 og Scenario 3	80
Tabell 22: Scenario 4, plassering av solavskjermingssystemet	81
Tabell 23: Termisk komfort Scenario 4, Sone 1.....	83
Tabell 24: Utforming av forbedret dobbelfasade.....	87
Tabell 25: Termisk komfort ved beste løsning og referansebygg i Sone 1.....	92
Tabell 26: Forenklet beregning av gjennomsnittlig dagslysfaktor ved kontorpult 1 i Sone 1 i mars måned, med solavskjerming.....	95
Tabell 27: Termisk komfort Sone 1, ved ulike vindusareal.....	96
Tabell 28: Endringer i den doble fasaden for følsomhetsanalysen	106
Tabell 29: Spesifikt energibehov for bygningen med beste løsning med forskjellig klimafilere for Oslo	109
Tabell 30: Termisk komfort, Sone 1.....	111

Liste over figurer og tabeller i vedlegg

A. 1 Tabell: DRY-klimadata	126
B. 1 Figur: Foreslått simuleringsmetodikk.....	127
B. 2 Figur: Scenarioene for referansebygget.....	128
B. 3 Figur: Oppbygging av doble fasader, referansebygget	129
B. 4 Figur: Oppbygging av fasaden, Scenario 0-1	129
B. 5 Figur: Oppbygging av fasaden, Scenario 0-2	130
B. 6 Tabell: Oversikt over oppbyggingen til Scenario 1	131
B. 7 Figur: Oppbygging av doble fasader, Scenario 1-1.....	131
B. 8 Figur: Oppbygging av doble fasader, Scenario 1-2.....	131
B. 9 Figur: Oppbygging av doble fasader, Scenario 1-3.....	132
B. 10 Figur: Oppbygging av doble fasader, Scenario 1-4.....	132
B. 11 Tabell: Beregning av åpningsareal.....	132
B. 12 Figur: Nummer på glassfasadene	133
B. 13 Tabell: Scenario 3, dybde på hulrommet	133
B. 14 Tabell: Scenario 4, plassering av solavskjermingsystemet	133
C 1 Figur: Tidsplan for de som oppholder seg i etasjen	134
C 2 Figur: Tidsplan for lys og utstyr	134
D 1 Tabell: Beregning av luftmengdene i sonene i referansebygget	135
E 1 Figur: Bredde, høyde og dybde på den doble fasaden i Sone 1	136
E 2 Figur: Temperatur i hulrommet ved ulike åpningsareal i IDA ICE	136
E 3 Tabell: Verdier som skal brukes i beregningen av volumstrømmen i hulrommet i Sone 1	136
E 4 Tabell: Beregnet mot simulert volumstrøm	137
F 1 Figur: Beste løsning på den doble fasaden med solavskjerming i hulrommet.....	138
F 2 Figur: Beste løsning på den doble fasaden med innvendig solavskjerming	138
F 3 Figur: Beste løsning på den doble fasaden med utvendig solavskjerming.....	139
G 1 Figur: Varmebehov ved ulike endringer i følsomhetsanalysen for modellen med beste løsning på dobbelfasaden.....	140
G 2 Figur: Kjølebehov ved ulike endringer i følsomhetsanalysen for modellen med beste løsning på dobbelfasaden.....	140
G 3 Figur: Varmebehov ved ulike endringer i klimafilen for referansebygget og modellen med beste løsning på dobbelfasaden	141
G 4 Figur: Kjølebehov ved ulike endringer i klimafilen for referansebygget og modellen med beste løsning på dobbelfasaden	141

Innholdsfortegnelse

Forord.....	iii
Sammendrag	v
Abstract	vii
Liste over figurer	ix
Liste over tabeller.....	xii
Liste over figurer og tabeller i vedlegg.....	xiii
Definisjoner	xviii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon.....	1
1.2 Mål.....	1
1.3 Struktur.....	1
1.4 Begrensninger.....	2
2 Energibruk i bygninger.....	3
2.1 Tekniske forskrifter og standarder	3
2.1.1 TEK 10	4
2.1.2 Passivhusstandard	5
2.2 Energiforbruk ved ulike bygningskategori og utforming.....	7
2.3 Energiforbruk etter region	9
3 Klima	10
3.1 Klimadata.....	10
3.2 Solenergi.....	14
3.2.1 Solinnstråling	14
4 Doble fasader	16
4.1 Historikk.....	16
4.2 Doble fasader - generelt.....	16
4.2.1 Klassifisering av doble fasader	17
4.2.2 Ventilasjonsprinsipper for hulrommet i dobbelfasader	19
4.2.3 Luftsirkulasjon for dobbelfasader	21
4.2.4 Kostnader	22
4.3 Termisk isolasjon	23
4.3.1 Varmeoverføring	23
4.3.2 Åpninger i den doble fasaden.....	27
4.3.3 Solavskjerming.....	28
4.4 Inneklima	31
4.4.1 Termisk miljø	31

4.4.2 Atmosfærisk miljø.....	33
4.4.3 Akustisk miljø.....	34
4.4.4 Aktinisk miljø	35
4.5 Doble fasader i forskjellig klima	36
4.5.1 Doble fasader i varmt klima	36
4.5.2 Doble fasader i kaldt klima	36
4.6 Simuleringsmetodikk for doble fasader i kontorbygg	37
4.6.1 Simuleringsmetodikk.....	37
4.6.2 utfordringer og svakheter	38
4.7 Oppsummering - doble fasader.....	38
5 Relevante simuleringsverktøy	40
5.1 IDA Indoor Climate and Energy	40
5.2 EnergyPlus	41
5.3 TAS-program.....	41
5.4 TRNSYS.....	42
5.5 ParaSol.....	42
5.6 SIMIEN	43
5.7 CFD – Computational fluid dynamics	43
6. Metode for simulering og analyse av doble fasader i IDA-ICE	44
6.1 Simuleringsverktøy.....	44
6.2 Fremgangsmåte for evaluering av doble fasader.....	44
6.3 Scenarier for analyse av den doble fasaden.....	44
6.3.1 Mulige utfordringer og svakheter ved simulering i IDA-ICE.....	46
7 Beskrivelse av referansebygget	48
8 Data for referansebygget	52
8.1 Innstillinger og forenklinger for simuleringsmodellen	52
8.2 Ventilasjonssystem	57
8.3 Varmedistribusjonssystem	58
8.4 Dobbelfasade.....	59
8.4.1 Korridorfasade.....	60
8.4.2 Størrelse på åpningene og dybden på hulrommet.....	61
8.4.3 Solavskjermingssystem.....	61
8.4.4 Oppsummering.....	61
9 Resultat og analyse.....	62
9.1 Energibruk og inneklima for referansebygget.....	62
9.1.1 Referansebygget med og uten dobbelfasade	66

9.2 Påvirkning ved endringer i den doble fasaden for referansebygget	70
9.2.1 Effekt av U-verdi på dobbelfasaden	71
9.2.2 Effekt av endring i dybde og åpningsareal i dobbelfasaden.....	74
9.2.3 Installering og plassering av solavskjermingssystem	81
9.3 Sammendrag av analysen med referansebygget	84
9.4 Parameteranalyse med forbedret dobbelfasade	87
9.4.1 Forbedret modell.....	87
9.4.2 Ulik størrelse på vindusarealet.....	93
9.4.3 Effekt av endring i åpningene mellom hulrommet og omgivelsene	97
9.4.4 Manuell styring av åpningen mellom omgivelsene og hulrommet.....	100
9.4.5 Effekt av ulik plassering av solavskjermingssystemet for forbedret modell.....	103
9.4.6 Følsomhetsanalyse	106
9.5 Klimadataanalyse.....	109
9.5.1 Endring i parametere i DRY-klimafilen	112
10 Diskusjon og oppsummering	115
11 Konklusjon	118
12 Videre arbeid	120
Referanseliste.....	121
Vedlegg.....	126
A. Klimadata	126
A.1 DRY- klimadata maksimum, minimum og gjennomsnittlig temperatur	126
B. Foreslått simuleringsmetodikk og Scenarioene	127
B.1 Foreslått simuleringsmetodikk.....	127
B.2 Oppsummering av Scenarioene	128
B.3 Scenario 0: ParaSol og IDA ICE - Oppbygging av doble fasader	129
B.4 Scenario 1: ParaSol - Oppbygging av doble fasader.....	131
B.5 Scenario 2 og 3: Størrelsen på åpningene og dybden på hulrommet.....	132
B.6 Scenario 4: Solavskjerming.....	133
C. Tidsplaner	134
D. Luftmengdeberegning.....	135
E. Beregnet volumstrøm i hulrommet.....	136
F. Solavskjerming i modellen med beste løsning på den doble fasaden.....	138
G. Følsomhets- og klimadataanalyse.....	140
G.1 Følsomhetsanalyse.....	140
G.2 Klimadataanalyse	141

Definisjoner

Aktivitetsnivå

Energiomsetninger i kroppen som genererer varme (metabolismen) avhenger av aktivitetsnivået, angis i enheten W/m^2 eller met. Her er $1 \text{ met} = 58 \text{ W}/m^2$ kroppsoverflate. Dette tilsvarer en energiomsetning for en stillesittende, avslappet person. Energiomsetningen for en lett stillesittende person i arbeid er 1,2 met, men stiger dersom aktivitetsnivået stiger.

Bekledning

Isolasjonsgraden til bekledning er den termiske motstanden mellom overflaten til hud og utvendig overflate på bekledning, Angis i enheten m^2K/W eller clo. $1,0 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2K/W$. En typisk innendørs sommerbekledning tilsvarer 0,5 clo, mens typisk innendørs vinterbekledning tilsvarer 1,0 clo.

Energibruk

Det faktiske energibruket til en bygning.

Energibehov

Energibehov er det beregnede eller antatt energimengde for å drive en bygning.

Internlast

Varme som avgis fra personer, lys, utstyr og andre prosesser inne i bygningen

Netto energibehov

Energibehovet til en bygning uten å ta hensyn til virkningsgrader eller tap i energisystemet.

Operativ temperatur

Den veide verdien av luftens tørrkuletemperatur (normalt lufttemperatur) og middelstrålings-temperatur (jevn temperatur på de på omgivende flater) som medfører samme varmeutveksling ved konveksjon og stråling som i de aktuelle omgivelsene (Sintef Energiforskning, 2007).

PMV – Predicted Mean Vote (forventet middelvotering)

PMV-verdien forutsier middelvurderingen på hvordan mennesker føler seg i det termiske miljøet. En 7-punktsskala fra -3 til 3 for å finne ut hvordan personene oppfatter det termiske miljøet (0 indikerer nøytralt, mens -3 er kaldt og 3 er varmt).

PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied (forventet prosentandel misfornøyde)

PPD gir et anslag i prosent over hvor mange personer i en større gruppe som er misfornøyde med det termiske klimaet i et gitt tilfelle.

Skorsteinseffekten

Også kalt oppdrift og oppstår fordi varm luft er lettere enn kald luft. Dermed vil den varme luften stige oppover i sjakten eller «skorsteinen».

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Bygninger står for ca. 40 % av det totale energiforbruket i Norge i dag (Sintef Energiforskning, 2007). Regjeringen har lagt frem mål for energieffektivisering i bygg frem mot 2040, hvor energibruken skal reduseres med 15 TWh allerede innen 2020 sammenlignet med dagens nivå (Olje- og energidepartementet, 2012). Bygningers energiforbruk varierer mye og vil være avhengig av blant annet byggeår, fasadeløsning, plassering, lokalt klima, størrelse og bruksområdet. Doble fasader er lite utbredt i Norge i dag, men ønsket om energieffektive bygninger og et godt innemiljø gjør at nye bygningskonstruksjoner stadig er i utvikling. Ved riktig bruk og prosjektering kan doble fasader blant annet redusere energibehovet til oppvarming og kjøling ved at hulrommet kan fungere som en termisk buffer. Luften i hulrommet blir varmet opp, og på vinterstid vil det derfor kunne oppnås en isolerende effekt på bygningskroppen. Ved riktig utforming kan den ytre glassfasaden redusere støy fra omgivelsene og gi muligheter for forskjellige ventilasjonsprinsipp mellom de to fasadene. Solavskjermingssystemet kan plasseres i hulrommet, mellom fasadene, hvor det vil være beskyttet for vær og vind. Dette vil kunne føre til reduserte kostnader på drift og vedlikehold på solavskjermingssystemet.

Doble fasader kan føre til overopphetning i varme og solpåvirkede perioder, da hulrommet kan komme til å «fange» varmen. Dermed bør det sees nærmere på dybden på hulrommet samt åpningsarealet mellom hulrommet og omgivelsene for å se hvor mye varme som kan transporteres ut med luftstrømmen. Det bør derfor også knyttes lokale klimadata til prosjekteringen siden solinnstrålingen og utetemperaturer har betydning for varmebalansen i bygget. En utfordring er at det er vanskelig å simulere energibruk og inneklime med «standard» simuleringsverktøy. Det bør derfor benyttes avanserte bygningssimuleringsverktøy for å få så realistiske verdier som mulig.

1.2 Mål

Målet med denne oppgaven er ifølge oppgaveteksten; *å foreslå en simuleringsmetodikk som kan benyttes for å simulere doble fasader på en god og enkel måte. Analysere inneklime og energiytelser ved bruk av doble fasader skal også presenteres.*

Opgaven ser dermed på ulike scenarier og løsninger ved bruk av doble fasader for å se hvordan energibruk i bygningen og inneklimate blir påvirket. Det blir også sett på hvordan klimaet i forskjellige klimafilere, for samme plass, vil kunne påvirke bygningens energibehov og innemiljø samt hvordan en endring i forskjellige variabler i klimafilen vil påvirke de simulerte resultatene. For å prøve å få så realistiske verdier som mulig er det avanserte bygningssimuleringsverktøyet IDA ICE brukt.

1.3 Struktur

Denne oppgaven er delt opp i to hoveddeler, en litteraturstudie og en case studie. Litteraturstudien innledes, i kapittel 2, med en oversikt over de siste tekniske forskriftene og standardene i Norge. Videre kommer en innføring i hvordan energibruken i bygninger, i Norge, endres ved bygningskategori og plassering. Kapittel 3 handler om klimadata ved energisimuleringer og hvordan disse påvirker den beregnede energibruken. Det er også her sett på solinnstråling i Norge og hvordan den har innvirkning på energibudsjettet og varmebalansen i en bygning. Kapittel 4 tar for seg doble fasader, både generelt og på et mer detaljert nivå. Den generelle biten handler om oppbyggingen og prinsipper med doble fasader, etterfulgt av en mer detaljert presentasjon som tar for seg U-verdier, termisk isolasjon, varmeoverføring og inneklime. I den neste delen er det sett på relevante simuleringsverktøy som kan benyttes for simulering av doble fasader, mens det i kapittel 6 blir sett på forskjellige metoder for simulering og analyse av doble fasader i IDA ICE.

Kapittel 7 tar for seg casestudien for referansebygget hvor de valgte dataene og andre beslutninger som er tatt i forhold til referansebygget gjennomgås og begrunnes. Kapittel 8 presenterer de valgte dataene for referansebygget samt de forenklingene som er gjort. Videre i kapittel 9 vil resultatene fra de ulike scenarioene bli presentert for å se hvordan inneklimate og energibruken i kontorbygget påvirkes av forandringer i ulike parametere. Kapittel 10 og kapittel 11 gir en diskusjon og konklusjon på de resultatene som ble funnet.

Til slutt i oppgaven kommer anbefalinger og videre arbeid.

1.4 Begrensninger

Litteraturstudien begrenser seg til å se på klima, inneklimate, doble fasader og energibruk i bygg. For å kunne få en bedre oversikt over hvordan klimafilene spiller inn på energibruk og inneklimate er det valgt å se på forskjellige klimafilene for samme plass. Det er også valgt å se om det er mulig å finne en generell simuleringsmetode for hvordan man simulerer med doble fasader i IDA ICE. Fra før finnes få eller liten informasjon om hvordan dette kan gjøres på en best mulig måte.

Når det gjelder simuleringene i IDA ICE er kontorbygget forenklet en del, da det er mest interessant å se på oppbyggingen av doble fasader og hvordan denne påvirker energibruk og inneklimate. I tillegg vil forenklingene bidra til at simuleringene blir raskere gjennomført og oppbyggingen blir mindre komplisert siden kontorbygg vanligvis er veldig store. Det er derfor valgt å bare se på en etasje, slik at rom som er orientert i alle retninger blir gjennomgått. Dette er for å se hvordan solinnstrålingen påvirker den operative temperaturen i soner med ulik plassering i bygningens fasade. Det vil også bli sett på hvordan soneinndelingen påvirker energibruket og ta en generell beslutning på hvilken soneinndeling som det vil lønne seg å simulere med. Det er valgt å se på fire hovedscenarioer som modellen simuleres etter. Dette er ulik U-verdi på den doble fasaden, ulik dybde på hulrommet, ulikt åpningsareal mellom hulrommet og omgivelsene samt ulik plassering av solavskjermingssystemet. I tillegg vil det bli gjort en parameteranalyse som tar for seg en forbedret løsningen av dobbelfasaden ved å implementere de beste løsningene av de fire hovedscenarioene fra referansebygget. Det vil i tillegg bli utført en følsomhetsanalyse samt en klimadataanalyse hvor det ble sett på om klimafilen vil spille noen rolle for energibruk og inneklimate. Ettersom beregningene i denne oppgaven kun er basert på endringer i den doble fasaden og disse fire hovedscenarioene, må det tas høyde for at andre implementeringer i selve driften, endringer i andre parametere eller materialer i bygget også vil kunne få konsekvenser for energibehovet og inneklimateet.

På grunn av tidsbegrensninger vil det ikke bli sett på mulighetene for at det kan oppstå kondens i hulrommet. Det vil heller ikke bli gjort en økonomisk analyse for å se på kostnadene av å bygge med doble fasader.

2 Energibruk i bygninger

Bygninger står for ca. 40 % av det totale energiforbruket i Norge i dag (Sintef Energiforskning, 2007). Energiforbruket i bygninger varierer mye og vil være avhengig av blant annet byggeår, plassering, lokalt klima, størrelse og bruksområdet (Peuhkuri et al., 2011). Det er flere muligheter for å oppnå lav energibruk i en bygning på bærekraftig måte og ifølge Peuhkuri et al. (2011) kan dette gjøres ved å:

- Minimere tap
- Maksimere gevinst
- Erstatte med bærekraftig energi

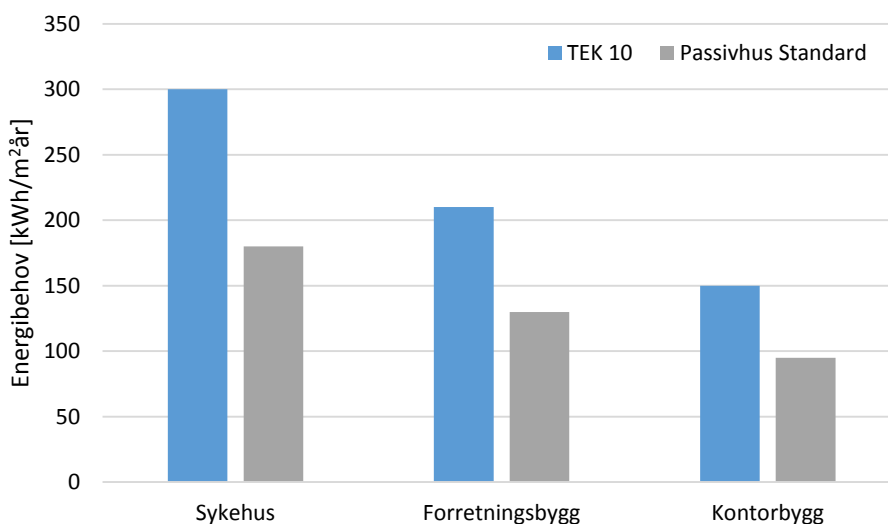
Det meste av energibruken går med til å skape et behagelig miljø innendørs gjennom oppvarming, ventilasjon og belysning. Driften av bygninger er dermed en energikrevende prosess og krever at man tenker effektivisering av energibruken og utforming ved rehabilitering og oppføring av nye bygg.

I dette kapittelet vil det bli lagt frem den siste tekniske forskriften for bygg, *TEK 10* og *Passivhus Standarden – NS 3701*, samt hvordan bygningsdesign og plassering av bygget spiller inn på byggets varme- og energibehov.

2.1 Tekniske forskrifter og standarder

For å kunne oppføre lovlige bygg i Norge setter *Forskrift om tekniske krav* grensen for et minimum av egenskaper som et byggverk må ha (Direktoratet for byggkvalitet, 2011). Politiske målsetninger og direktiver fra EU legger grunnlaget for nye energikrav i teknisk forskrift til plan- og bygningsloven. I forhold til en normal utvikling av energibruken, er en av hovedpunktene i EUs klima- og energipolitikk å oppnå 20 % energisparing fra økt energieffektivitet innen 2020 (Fornybar, 2013). De tekniske forskriftene inneholder generelle funksjons- og ytelseskrav til bygninger og bygningsdeler, som med jevne mellomrom revideres og oppdateres.

Figur 1 viser at det er en betydelig reduksjon i energibehovet, for en spesifikk bygningskategori, etter hvilken standard bygningen bygges etter.



Figur 1: Årlig energibehov ved bruk av TEK 10 og passivhusstandard (BoligEnøk)

Figur 1 viser at reduksjonen fra TEK 10- til passivhusstandard vil være fra 30 % – 40 % i årlig energibehov. Den største forskjellen mellom et bygg bygget etter passivhusstandard og et bygg som er bygget etter TEK 10, er isolasjonstykkelsen. Isolasjonen i bygningskonstruksjonen i passivhus

er tykkere enn i bygg bygget etter standarden for TEK 10. Dette gjør at varmetapet i passivhus blir mye mindre enn for TEK 10-bygg. Utformingen og konstruksjon på bygget avgjør varmetapet fra bygningskroppen, og vil være en påvirkende faktor for energiforbruket i bygningen. Tabell 1 viser kravene til enkeltverdier, kuldebroer og infiltrasjon i de forskjellige standardene.

Tabell 1: Krav til enkeltverdier for TEK 10 og passivhusstandard

Krav til enkeltverdier	TEK 10	Passivhusstandard
U-verdi for dører og vinduer	$\leq 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$
U-verdi yttervegg	$\leq 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$
U-verdi gulv mot grunn	$\leq 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$
U-verdi tak	$\leq 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$
Normalisert kuldebroverdi for hele bygningen	$\leq 0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$
Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner	$\geq 80 \%$	$\geq 80 \%$
SFP-faktor (vifteeffekt) for ventilasjonsanlegg	$\leq 2 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$	$\leq 1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$
Lekkasjetall ved 50 Pa, n_{50}	$\leq 1,5 \text{ h}^{-1}$	$\leq 0,60 \text{ h}^{-1}$

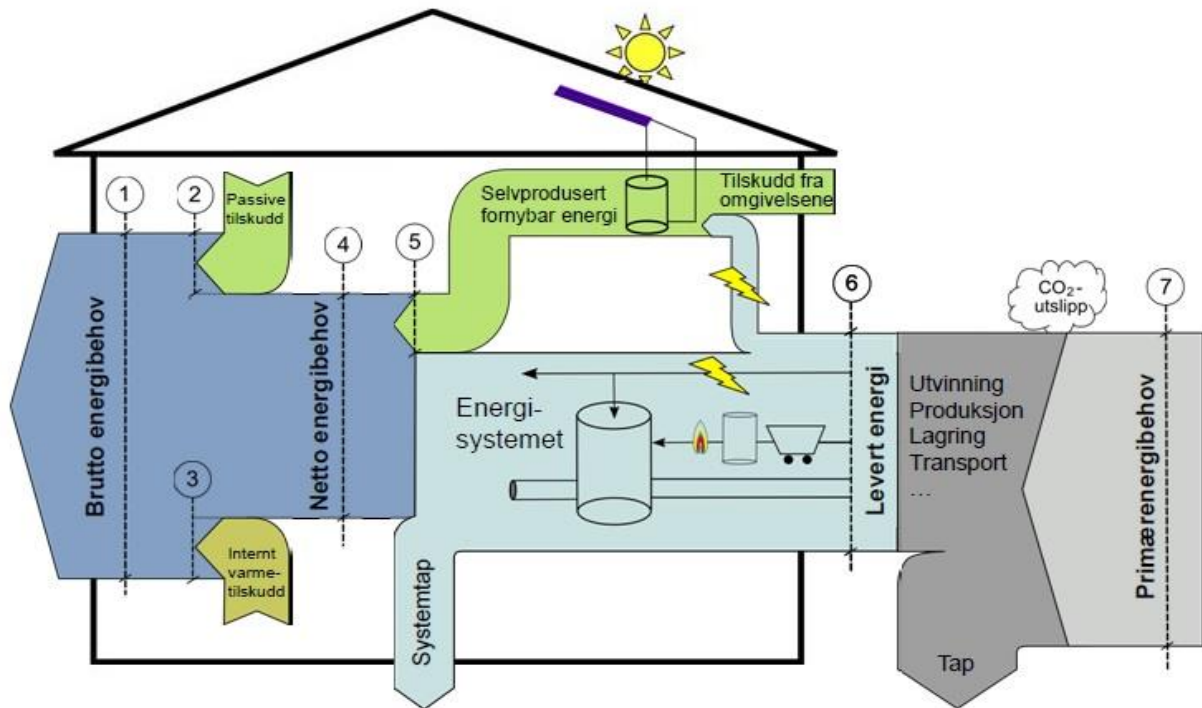
2.1.1 TEK 10

Byggteknisk forskrift, TEK, skal sikre at tiltak gjennomføres og prosjekteres med hensyn til god visualitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til helse, miljø og energi (Lovdata, 2010). Det bør prioriteres et lavt energibehov når byggverk prosjekteres, derfor trekker TEK 10 opp grensen for et minimum av egenskaper et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge.

Figur 2, gjengitt fra Høseggen (2008), viser systemgrenser for ulike energibegreper som tilhører bygningskroppen. Figuren illustrerer prinsippet av energistrøm gjennom en bygning. Når det skal utføres en energiberegning, skal bevegelsen gå fra venstre mot høyre i figuren. Punkt 1 starter med bygningskroppen og dens varmetap, før den utvides med interne og passive tilskudd. Netto energibehov illustreres i Punkt 4, det vil si bygningens energibehov uten hensyn til energisystemets virkningsgrad eller tap i energikjeden. Netto energibehov er altså den energien bygningen trenger til drift, og det er den energien det stilles krav til i teknisk forskrift.

Netto energibehov i bygninger fordeles mellom seks poster iht. *NS 3031:2007 Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data*. Disse punktene er:

- Oppvarming
- Varmtvann
- Belysning
- Teknisk utstyr
- Kjøling



Figur 2: Systemgrenser for energiberegning (Høseggen, 2008)

Figur 2 viser altså systemgrensene for energiberegning. I henhold til forskriftene kan det benyttes to måter for å oppfylle kravet til energibruk. Enten ved §14-3 som er *Energiltaksmodellen*, eller ved §14-4 som er *Energirammemetoden*. Energiltaksmetoden sier at man må tilfredstille alle energiltakene mens Energirammemetoden setter krav til netto energibruk for den aktuelle bygningstypen (Lovdata, 2010). Energiltakene i TEK 10 vises i Tabell 1.

2.1.2 Passivhusstandard

Passivhus er karakterisert ved at bygningen har veldig lavt oppvarmingsbehov, hvor hovedstrategien for å oppnå slike lave verdier er reduksjon av varmetapet fra bygget. Grunnen til at det kalles passivhus er fordi det brukes passive tiltak for å redusere energibehovet, som ekstra isolasjon og bedre varmegjenvinner. I Norge er kriteriene for passivhus, for henholdsvis boligbygninger og yrkesbygninger, gitt i *NS 3700:2012* og *NS 3701:2012*. Passivhus har altså en bygningskropp bestående av svært godt isolerte yttervegger, tak og gulv som skal holde den ønskede varmen i bygningen – eller uønsket varme ute, samt spesialvinduer for bedre U-verdi (Passive House Institute, 2012). I tillegg prøver man å utnytte passiv solvarme på en effektiv måte, ved at vinduer ofte blir plassert i solrik orientering.

Passivhus kan tillate oppvarming og kjølingsrelaterte energibesparelser på opptil 90 % sammenlignet med typiske bygninger og over 75 % sammenlignet med gjennomsnittlige nybygg (Passive House Institute, 2012). Selv om bygningen skal spare energi er det ikke meningen at komforten i bygningen skal bli dårligere, den skal heller økes betraktelig. For å oppnå passivhusstandard i henhold til *NS 3701:2012*, er det en rekke krav en bygning må tilfredstille, disse vises i Tabell 1.

Den norske standarden *NS 3701:2012*, for yrkesbygninger, opererer med et maksimums spesifikt varmebehov som er justert i forhold til klima, altså den årlige gjennomsnittlige temperaturen på den spesifikke plassen. I tillegg til den gjennomsnittlige temperaturen, så er det spesifikke varmebehovet justert i forhold til hvor stort det oppvarmede gulvarealet er. Det spesifikke varmebehovet justeres

etter om den årlige gjennomsnittstemperaturen er over eller under 6,3 °C og om oppvarmet gulvareal er over eller under 1000 m².

Dersom den årlige gjennomsnittlige temperaturen er lik eller over 6,3 °C og gulvarealet er under 1000 m² er det spesifikke varmebehovet for bygningskategorien «kontorbygg» ifølge NS 3701:2012 beregnet ut fra Ligning 1, hvor A_{fl} [m²] er oppvarmet gulvareal.

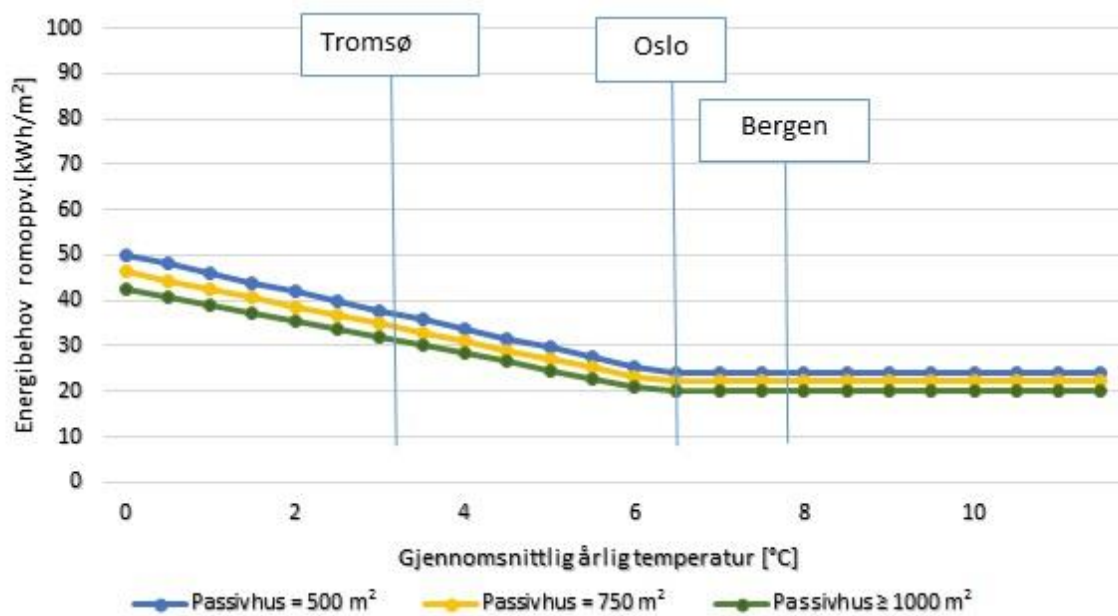
$$\text{Spesifikt varmebehov} = 20 + 0,85 \cdot \frac{(1000 - A_{fl})}{100} \text{ [kWh/m}^2 \text{]} \quad (1)$$

Det spesifikke varmebehovet for et kontorbygg med gulvareal over 1000 m² og gjennomsnittlig temperatur over eller lik 6,3°C er beregnet til å være 20 kWh/m²år. Ligning 2 og Ligning 3 beregner varmebehovet for et «Kontorbygg» dersom årsmiddeltemperaturen er mindre enn 6,3 °C og med oppvarmet gulvareal som er henholdsvis under og over 1000 m². θ_{ym} [°C] er årsmiddeltemperaturen.

$$\text{Spesifikt varmebehov} = 20 + 0,85 \cdot \frac{(1000 - A_{fl})}{100} + \left(3,6 + 0,1 \cdot \frac{(1000 - A_{fl})}{100} \right) (6,3 - \theta_{ym}) \text{ [kWh/m}^2 \text{]} \quad (2)$$

$$\text{Spesifikt varmebehov} = 20 + 3,6 \cdot (6,3 - \theta_{ym}) \text{ [kWh/m}^2 \text{]} \quad (3)$$

Figur 3 illustrerer det nødvendige varmebehovet for bygningskategorien «Kontorbygg» med oppvarmet gulvareal fra 500-1000 m² med passivhusstandard, hvor oppvarmingsbehovet er beregnet fra Ligning 1, 2 og 3.



Figur 3: Varmebehov for bygningskategorien "Kontorbygg" med oppvarmet gulvareal fra 500-1000m²

Årsmiddeltemperaturen i Tromsø er 2,9 °C (Stene, 1997), og ut ifra denne temperaturen kan det spesifikke varmebehovet for et «Kontorbygg» over 1000 m² beregnes. Netto energibehov for romoppvarming vil da omtrent være 32,3 kWh/m²år illustrert i Figur 3. Årsmiddeltemperaturen i Oslo og Bergen ligger på henholdsvis 6,3 °C og 7,6 °C, og dermed skal varmebehovet til et kontorbygg på over 1000 m² ligge på 20 kWh/m²år.

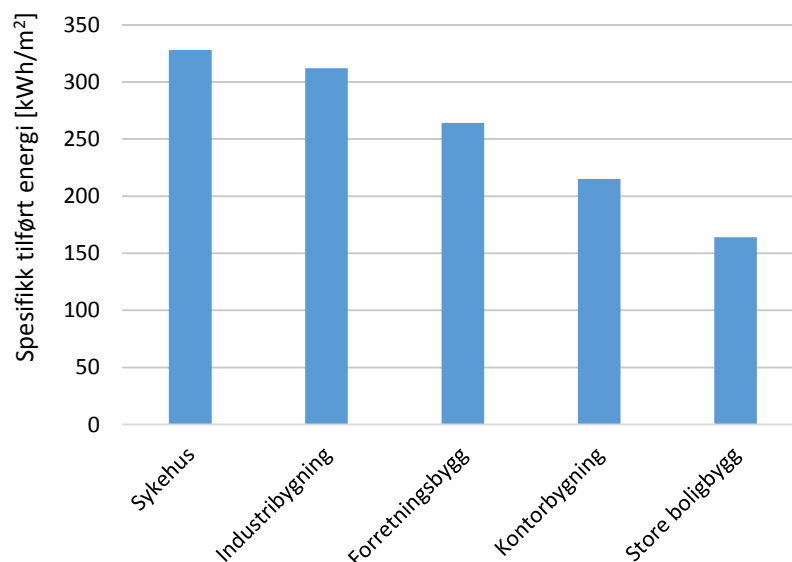
2.2 Energiforbruk ved ulike bygningskategori og utforming

Bygningsdesignere streber alltid etter å oppnå et godt miljø innendørs, som til hvilket som helst tidspunkt på dagen, hele året, er komfortabelt. Uansett hvordan klimaet er utendørs, skal det gode innendørsklimaet kunne opprettholdes. IEA EBC prosjekt «Annex 53 Total Energy Use in Buildings» har identifisert seks påvirkende parametere på bygningens energiforbruk (EBC, 2013):

- Klima
- Bygningskonstruksjon
- Tekniske systemer og utstyr
- Drift og vedlikehold
- Bruksmønster
- Krav til inneklime

For å oppnå en optimal fasade med hensyn på energibruk, er det ønskelig å finne kryssningspunktet for tilfredsstillende dagslys og inneklime, samtidig som bygningen har et lavt energiforbruk. Den tekniske utformingen på bygget avgjør varmetapet fra bygningskroppen og selv med god isoleringsgrad på bygningen vil det forekomme varmetap til omgivelsene. Størrelsen på varmetapet avhenger av bygningskonstruksjonens sammensetning, valg av materialkvalitet og isoleringsevne mot varmetap.

Figur 4 viser en oversikt over energiforbruket i noen utvalgte bygningskategorier. Energibruken er steds- og temperaturkorrigert og er oppgitt i spesifikk tilført energi, som vil si mengden tilført energi i løpet av ett år dividert på oppvarmet areal. Det er nødvendig å temperatur- og stedskorrigere tallene for eliminere eksterne og lokale variabler. Det vil dermed bli lettere å sammenligne forbruket fra år til år i like bygg som befinner seg på forskjellige steder i landet.

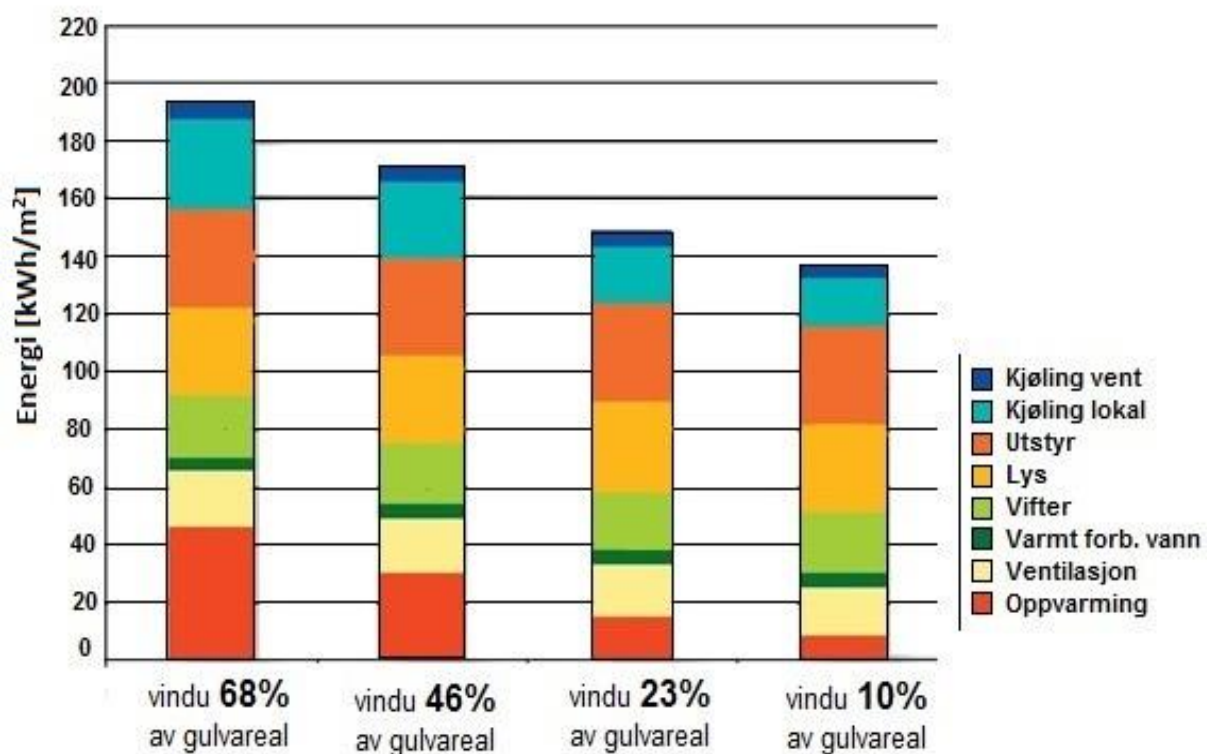


Figur 4: Spesifikk tilført energi til ulike bygningstyper, temp.- og stedskorrigert (Enova, 2011)

Store boligbygg og kontorbygg bruker mye mindre energi sammenlignet med f.eks. sykehus og industribbygg. Forskjellen er omtrent 100-170 kWh/m², som illustrert i Figur 4. Ventilasjonsbehovet i industribbygg og sykehus er større enn for store boligbygg og kontorbygg og dette kan være en årsak til differansen i energibehovet. I tillegg har sykehus døgnkontinuerlig drift, spesielle temperaturkrav samt stort varmtvannsbehov, og alle disse postene vil øke energibruket. Oppbyggingen og

utformingen, i tillegg til hvordan bygget driftes, vil ha noe å si for energibehovet i den aktuelle bygningen. Både planløsning, arealutforming og soneinndeling i bygg vil kunne ha innvirkning på inn klima og energi- og effektbehov. Kompakthet i bygget reduserer energibehovet, ved at transmisjonstapet gjennom ytterflatene kan reduseres (Sintef Energiforskning, 2007). Altså vil en bygning med minst overflateareal i forhold til volum kunne minske varmetransporten gjennom ytterveggene. Materialer har både en evne til å lede varme og til å lagre varme. Det er viktig å se på spesifikk varmekapasitet til materialene, da en vegg med høy varmekapasitet kan gi fra seg varme til omgivelsene om natten og ha lav absorpsjon av solvarme om morgenen. De beste materialene til å «lagre» varmen er tunge materialer. Ved tunge byggematerialer er det vanskelig å få til en hurtig temperaturregulering, men denne typen materialer har en god temperaturutjevning i bygget, da varmen «lagres» i konstruksjonen.

Et bygg som består av stort glass- eller vindusareal kan ha andre varmetapsposter, siden mye av varmen vil forsvinne gjennom glassarealet. Figur 5 viser energibehovet for et kontor med ulike vindusareal uten solavskjerming.

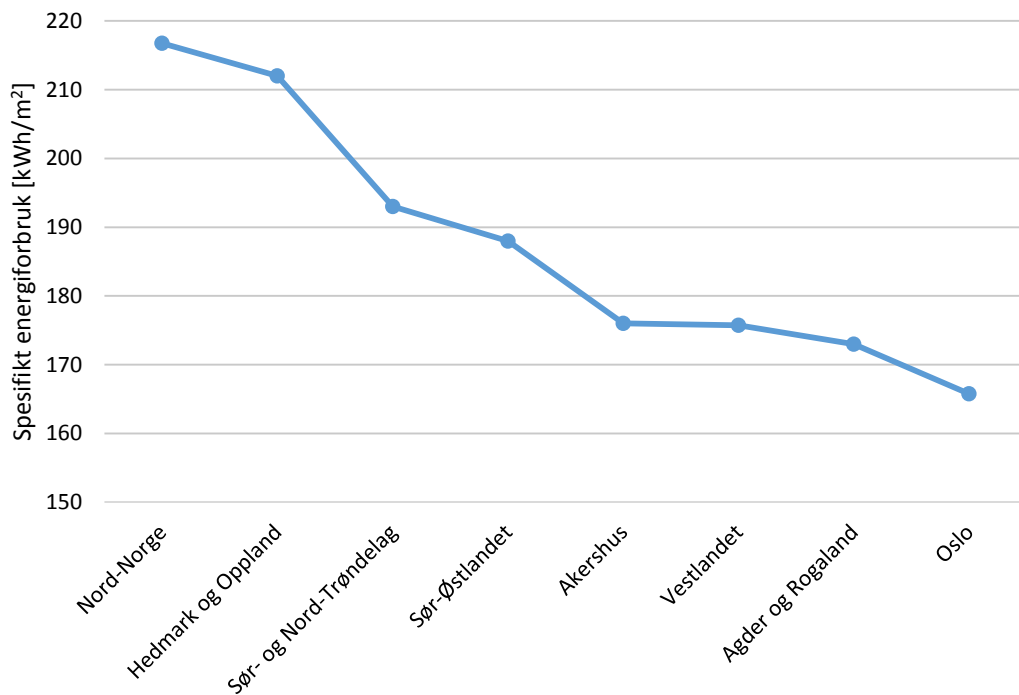


Figur 5: Energibruk for cellekontor ved ulike vindusarealer (Erichsen & Horgen AS, 2007)

Av Figur 5 kan man se at det hovedsakelig er behovet for oppvarming og kjøling som reduseres dersom vindusarealet blir mindre. For energibruk ved oppvarming vil det utgjøre en reduksjon på omtrent 50 kWh/m² fra det største vindusarealet til det minste. Hovedårsaken er at mye varme går tapt gjennom det store vindusarealet som har en mye dårligere varmemotstand enn selve bygningskroppen. Selv med optimal orientering for solvarme på en glassfasade eller et vindu, vil disse ha større varmetap gjennom fyringssesongen enn en isolert yttervegg (Sintef Energiforskning, 2007). Til gjengjeld vil et stort glassareal kunne gi økt utnyttelse av dagslys og bedre utsyn og visuell komfort.

2.3 Energiforbruk etter region

Energibruken og varmebehovet i en bygning er svært påvirket av det ytre klimaet. Norge er et utstrakt land som vil ha varierende klima etter hvor man befinner seg, og dette vil spille en rolle for energiforbruket i bygningen. Figur 6 viser statistiske verdier for gjennomsnittlig spesifikt energiforbruk i boliger, fra årene 2004 – 2012, etter region.



Figur 6: Gjennomsnittlig (2004, 2006, 2009 og 2012) spesifikk energibruk [kWh/m²] for boliger etter region (SSB, 2013).

Figuren viser at det gjennomsnittlige energiforbruket i norske boliger vil være størst i Nord-Norge, noe som hovedsakelig skyldes et kaldere klima i regionen. Sammenlignet med Oslo er det gjennomsnittlige energiforbruket omtrent 24 % høyere i Nord-Norge. Kaldere klima forårsaker altså et større energibehov, og derfor er det nødvendig at bygninger tar hensyn til dette for å kunne opprettholde et godt innneklima. Selv om figuren viser energibruk i boliger, kan man trekke paralleller til andre bygningskategorier også, da disse vil kunne påvirkes like mye av klimaet som boliger.

Ligning 4 (Thue, 2012) viser beregning av bygningens samlede effektbehov til oppvarming, hvor Q_t [W] er transmisjonstap, Q_v [W] er ventilasjonstap og Q_i [W] er infiltrasjonstap.

$$Q = \sum Q_t + Q_v + Q_i \quad [W] \quad (4)$$

For å kunne bestemme varmeeffekten til varmeanlegget må effektbehovet på den kaldeste dagen i året beregnes. Størrelsen på de dimensjonerende forholdene i bygget og på stedet hvor bygget skal oppføres må da være kjent. Som ligningen illustrerer vil et bygg med høyt transmisjonstap ha større effektbehov for oppvarming enn et bygg med mindre transmisjonstap. Altså vil bygningers geografiske plassering være avgjørende når energibruket skal vurderes, siden klimaet direkte påvirker de termiske lastene og energiytelsen til en bygning.

3 Klima

Energiforsyningen fra sola er enorm, gjennomsnittlig mottar jordas overflate omtrent $1,2 \cdot 10^{17}$ W av solens effekt (Markvart, 2000). Omtrent $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh av solinnstrålingen treffer jorden hvert år, og er omtrent 15 000 ganger det årlige energiforbruket som trengs for hele verden (Andresen, 2008). Den årlige solinnstrålingen i en bygning avhenger av breddegrad og plassering i terrenget. Ved økende breddegrad minker solstrålingen og sesongvariasjon blir mer markert (Markvart, 2000). I dette kapitlet kommer det en oversikt på ulike klimadata og -filer som kan brukes i ulike energisimuleringsprogram. Videre blir det sett på solenergien og hvordan denne kan utnyttes, samt hvordan solinnstrålingen i bygninger påvirker inneklimate og energibruken.

3.1 Klimadata

Fasaden skiller innendørsklimaet fra uteomgivelsene, og det er mange faktorer som må tas hensyn til for å designe et effektivt fasadesystem når omgivelsene og klimaet varierer. Grunnlaget for klimadata er systematiske observasjoner av været over en lengre periode. Ved simulering med dataverktøy trengs det klimafilene som inneholder riktig og timesbasert meteorologisk data. Valget av den typiske meteorologiske måneden i en klimadatafil er basert på statistisk analyse og evaluering av fire værparametere (Hong et al., 2013):

- Omgivelsestemperatur (Tørrkuletemperatur)
- Duggpunktstemperatur
- Vindhastighet
- Global solinnstråling

I de siste årene så har det blitt brukt forskjellige typer av klimadata i bygningssimuleringer for å evaluere energibruk og etterspørsel. Noen av de brukte værdatabasene er «Test Reference Year» (TRY), «Typical Meteorological Year (TMY)», «Design Reference Year» (DRY), «Actual Meteorological Years» (AMY), «Weather Year for Energy Calculations» (WYEC) og «International Weather Year for Energy Calculations» (IWEC)

- TRY-filer inneholder målte meteorologiske data, hvor referanseåret er funnet ved å eliminere år som inneholder måneder med høye og lave temperaturer. TRY er et historisk år som er nærmest det gjennomsnittlige året (typisk over en 30 års periode) (Pedersen, 2007).
- TMY, typisk meteorologisk år, er konstruert på samme måte som et TRY-format, forskjellen er at dataene representerer individuelle måneder istedenfor et helt sammenhengende år. Altså er de 12 typiske meteorologiske månedene i en TMY-fil valgt fra ulike kalendermåneder i en flerårig database og inneholder timesbaserte verdier av solstråling og meteorologiske elementer for en ett års periode. Algoritmer blir brukt til å glatte over diskontinuerligheter fra dataene for å unngå endringer mellom to tilknyttede måneder valgt fra forskjellige år (Hong et al., 2013).
- AMY, faktisk meteorologisk år, er de faktiske timesbaserte dataene for et spesielt kalenderår. Værdatabasen for det faktiske meteorologiske året er spesielt nyttig for å modellere år med ekstremvær og dermed finne energibruken til bygningene (Hong et al., 2013). Både TMY- og AMY værdatabaser bør bli valgt så tett opp mot beliggenheten til bygningen som mulig. På grunn av den langsiktige klimaendringen bør også de nyeste klimadataene velges og de bør reflektere værvariasjoner som kan kunne oppstå senere.
- DRY er et videre forsøk på å modifisere TRY til å bli enda mer lik de årlige gjennomsnittlige månedene. Her justeres parametere i de valgte månedene slik som tørr-kuletemperatur,

solinnstråling og fuktighet (ikke vind), og dette gjøres ved at enkelte dager blir erstattet med andre dager fra tidligere år (Skarteivt et al., 1994).

- WYEC er konstruert ved å bestemme de timesbaserte dataene for hver måned hvor midlere tørrkuletemperaturen og solinnstråling er nærmest den gjennomsnittlige tørrkuletemperaturen og solinnstrålingen for den måneden i løpet av en 30 års periode (Pedersen, 2007). Resten av måneden er konstruert ved å bytte ut dager i måneden med dager fra andre år for å få gjennomsnittet for den gjeldende måneden nærmere 30-års gjennomsnittet.
- IWEC datasettene inneholder «typiske» værdata basert på TMY-format som har som hensikt å bli brukt i energisimuleringsprogram. Energisimuleringsprogrammet IDA ICE opererer med klimadata fra IWEC-filer som er typiske værdata for en ettårs periode. IWEC er et resultat av «ASHRAE Research Project» som baserer seg på værinformasjon hentet ut fra U.S National Climatic Data Center (U.S Department Of Energy, 2011b). IWEC-filene inneholder timesbaserte værobservasjoner som omgivelsestemperatur, duggpunktstemperatur, vindstyrke og vindretning. Siden IWEC-filene er klimadata for «typiske» år vil den dermed ikke være passende å bruke ved dimensjonering av HVAC-systemer som krever at det tas hensyn til ekstremvær.

Hong et al. (2013) sammenlignet hvordan klimadata for et typisk meteorologisk år, TMY, påvirket energibruk og inneklima i en bygning mot et faktisk meteorologisk år, AMY. Han analyserte deretter dataene og fant ut at typiske værdata ikke alltid vil være representativ for den gjennomsnittlige energibruken over en lengre periode, og at de typiske værdataene kan være betydelig lavere eller høyere enn de faktiske værdataene.

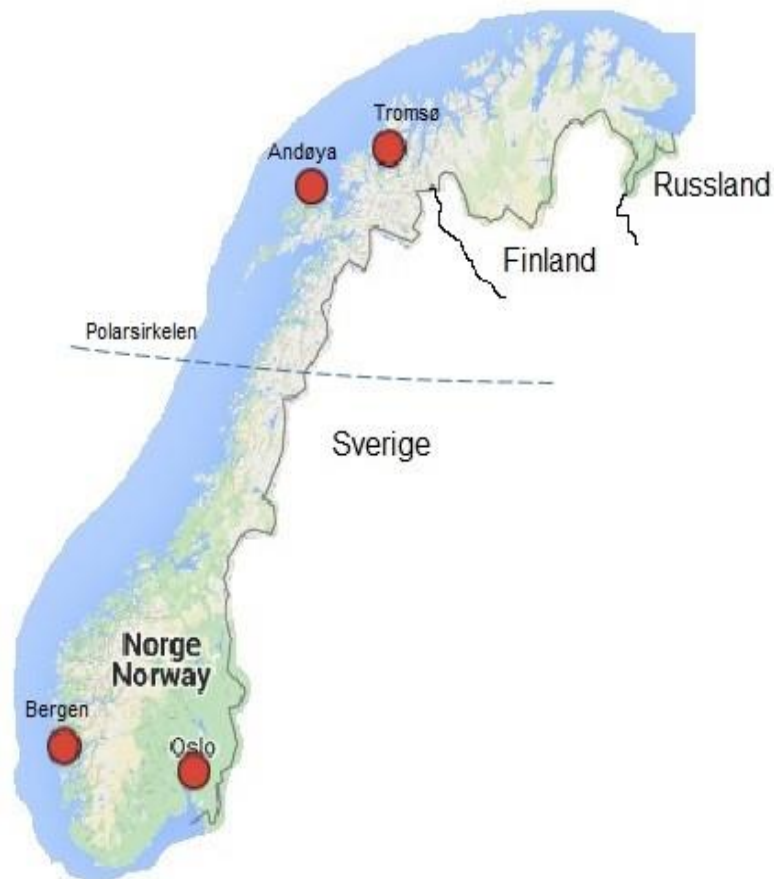
Innenfor faktorer som solstråling, vind og temperatur kan variasjonen avhenge av det lokale klimaet i regionen eller kommunen (Rambøll, 2013). Når simuleringer skal utføres kreves det at det finnes gode klimadata-sett som kan brukes for å få så realistiske verdier som mulig. Klimadatafiler som inneholder timesdata for temperaturer, solinnstråling og vind er nødvendig for å oppnå dette, i tillegg skal de reflektere «gjennomsnittsklima» på stedet. En utvidet studie av Crawley (1998) sammenlignet simuleringsresultater for en 30 års periode ved å bruke forskjellige referanseår (TRY, TMY, TMY2, WYEC, WYEC2) for resultatene basert på faktiske timesbaserte værdata, fra 1961 til 1990. En av konklusjonene i studien var at brukere av simuleringsprogram burde unngå å bruke TRY-værdata, da ingen enkelte år kan representere de typiske langsiktige værmønstrene (Crawley, 1998). I tillegg ble det anbefalt at fremtidige værdata burde inneholde kalde/overskyede og varme/solrike år for å kunne se på mer enn gjennomsnittlige og typiske forhold og på den måten finne simuleringsresultater som identifiserer noe av usikkerheten som finnes i været.

Beregning etter standard referanseklima er relevant for å dokumentere og sammenligne bygningens energiytelse mot offentlige krav. Dagens forskrift angir energirammer for normert klima, altså et referanseår basert for meteorologiske data for Oslo. Klimadatasett for norske steder er blitt utviklet og generert ved hjelp av Metenorm, en meteorologisk referanse som genererer syntetiske klimasett basert på både målte og statistiske metoder (Rambøll, 2013). Klimadataene i simuleringsprogrammet SIMIEN er generert av MeteoNorm og disse vil det bli sett på senere i oppgaven. De vil da bli referert til som «Meteo-klima».

I Norge i dag er det bare det bare blitt utviklet såkalte Design Reference Years, DRY, for Oslo (59,9° N), Bergen (60,6° N) og Andøya (69,3° N) i forbindelse med IEA-prosjektet SHCP Task 9 – "Solar Radiation and Pyranometry" (Lund, 1995). Disse dataene er utarbeidet fra sett på 10 klima-år med

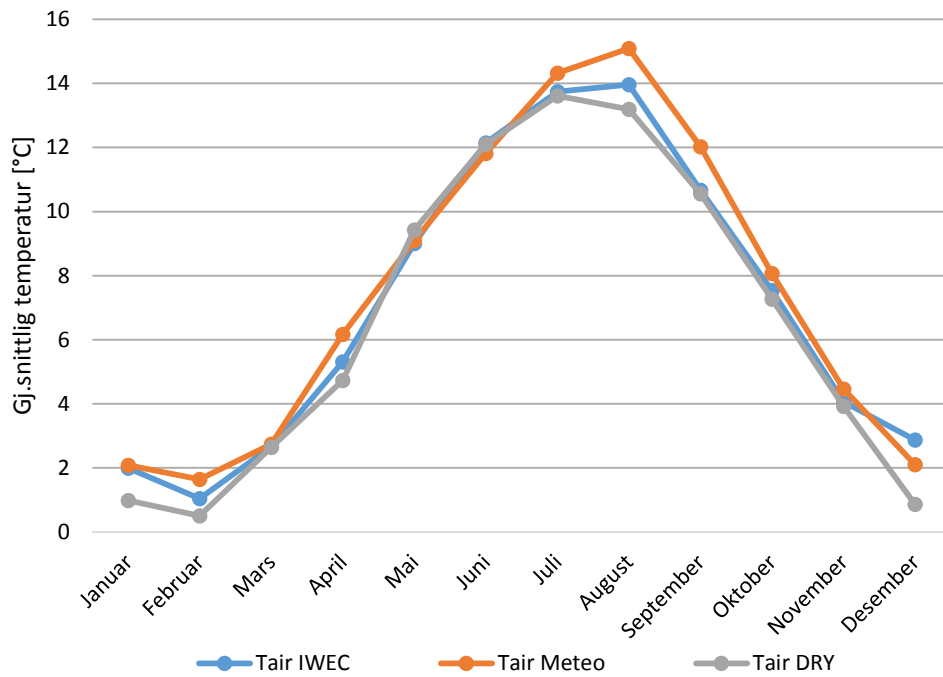
utvalg av typiske måneder (Skarteivt et al., 1994). I VEDLEGG A. Klimadata er månedlig maksimums, minimums og gjennomsnittlig temperatur for DRY-filene oppsummert.

Norge er et utstrakt land hvor store deler befinner seg over polarsirkelen. Norges klima er preget av Golfstrømmens påvirkning, som følger Norges kyst nordover og gjør at klimaet i Norge er forholdsvis mildt sammenlignet med andre land på samme breddegrad (Høseggen, 2008). Figur 7 viser et kart over Norge med plassering av Tromsø, Andøya, Bergen og Oslo.

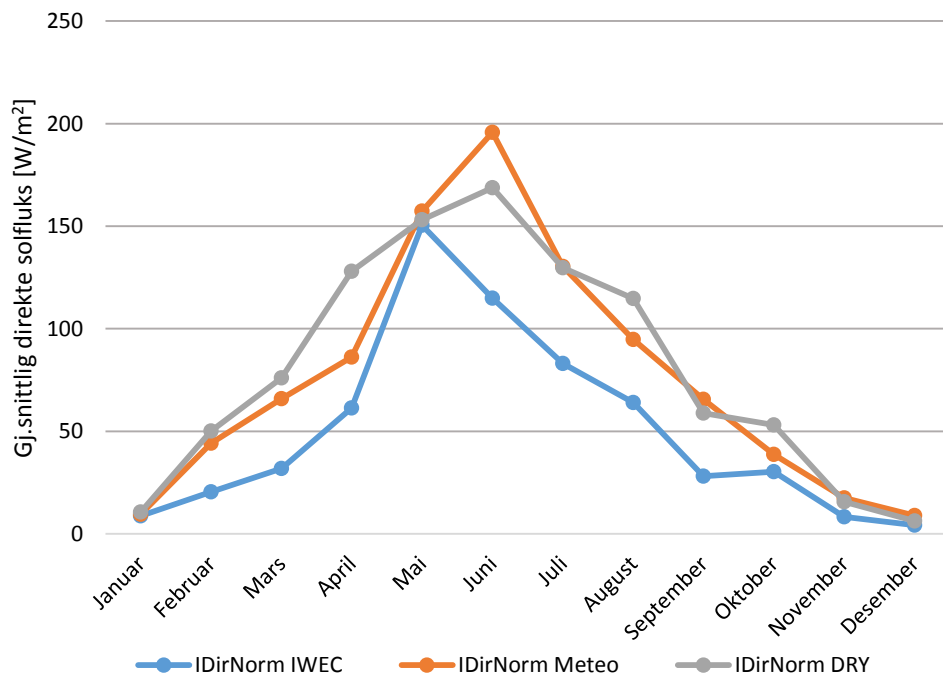


Figur 7: Kart over Norge, med plassering av Tromsø, Andøya, Bergen og Oslo

Bhandari et al. (2012) sammenlignet tørrkuletemperatur, relativ fuktighet, direkte, diffus og horisontal stråling samt vindhastighet ved hjelp av tre typiske værdatasett fra ulike kilder for et kalenderår. Studien fant at den største forskjellen i individuelle variabler kan være så stor som 90 %. Bygningers energiforbruk kan variere med 7 %, mens månedlig bygningslast kan variere med 40 % når man bruker forskjellige værdatasett (Bhandari et al., 2012). Figur 8 og Figur 9 viser gjennomsnittlig temperatur og solfluks for ulike klimafilere for Bergen. Som figurene viser opererer ikke klimafilene med de samme tallene selv om dataene er for samme plass, og dermed er det mulig at ulike klimafilere vil gi forskjellig resultat på energibruk og inneklimate.



Figur 8: Gjennomsnittlig temperatur for ulike klimafiler, IWEC, Meteo og DRY, for Bergen



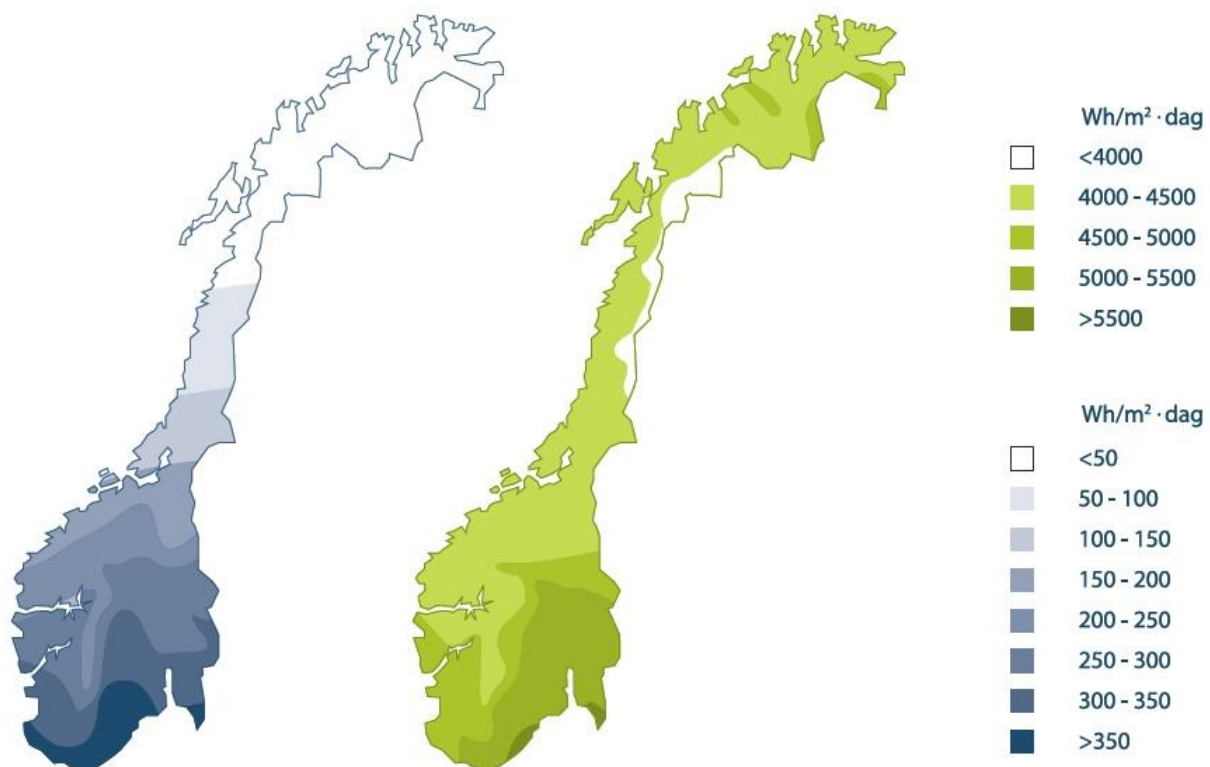
Figur 9: Gjennomsnittlig direkte solfluks for ulike klimafiler, IWEC, Meteo og DRY, for Bergen

3.2 Solenergi

Solenergi er strålingsenergi fra solen. Mengden solenergi som treffer jorden i løpet av ett år, er om lag 15 000 ganger større enn hele verdens årlige energiforbruk (Markvart, 2000). Denne energien er gratis energi og varme som kan utnyttes i bygg for å oppfylle nye byggetekniske krav.

3.2.1 Solinnstråling

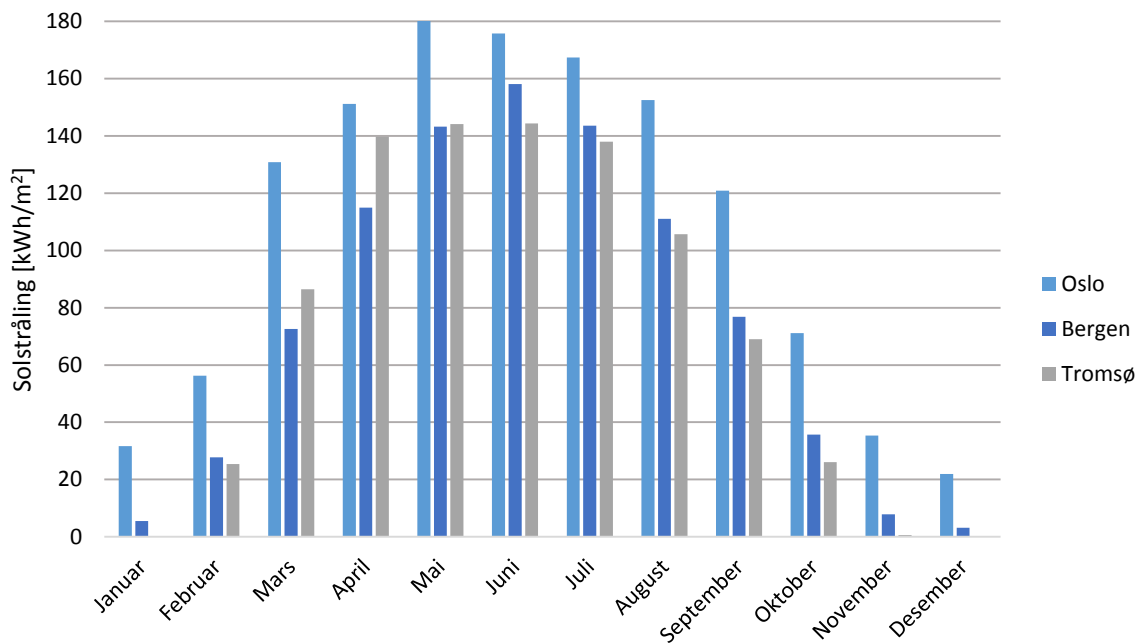
I Norge varierer den årlige solstrålingen omtrent mellom 700 kWh/m² i nord og 1100 kWh/m² i sør på grunn av forskjellig breddegrad (Fornybar, 2007). Hvor mye solstråling som treffer en fasade avhenger av breddegrad, plassering i terrenget, tid på året og tid på døgnet. Som sett i Figur 10 vil solstrålingen gjennom sommeren være høyere enn på vinteren og det er også stor forskjell i årlig solinnstråling mellom de ulike landsdelene.



Figur 10: Solinnstråling mot horisontal flate i januar og juli (Fornybar, 2007)

Som figuren over illustrerer er det store variasjoner mellom årstidene for hvor mye solinnstråling som treffer jordas overflate. Dette er en faktor som det må tas hensyn til ved bruk av store glassarealer i bygg. For eksempel er den varierende solhøyden i Oslo, klokka 12 i mars 30°, mens den på samme tidspunkt i juni er 56° (Erichsen & Horgen AS, 2007). Dermed vil det være store variasjoner for hvor mye solinnstråling som treffer fasaden, og også hvor på fasaden solinnstrålingen treffer. Passiv solvarme er den formen for solenergi som i dag er mest utbredt i Norge, og går ut på at man slipper solvarmen inn i huset (Norsk Solenergiforening, 2014). Dersom bygningskonstruksjonen utformes optimalt kan innstrålingen sørge for «gratis» varme til bygget gjennom vinduer, yttervegger og tak. Under norske klimatiske forhold kan rett konstruksjon, utforming og bygningens orientering gi reduksjon i oppvarmingsbehovet og sørge for at man utnytter solens energi på best mulig måte.

Det er nødvendig å se på den månedlige solinnstrålingen for å se om man kan utnytte solenergien som vil treffe bygningen. Figur 11 viser månedlig solinnstråling gjennom året i henholdsvis Oslo, Bergen og Tromsø. Her kan vi se store forskjeller ved at Tromsø ligger over polarsirkelen og vil dermed ha lite solinnstråling i perioden november til januar.



Figur 11: Månedlig solinnstråling i Oslo, Bergen og Tromsø simulert mot sør med optimisert vinkel (34grader) (European commission and J.R.C, 2012)

Solinnstrålingen som kommer inn i bygget gjennom vinduer vil kunne ha både positivt og negativt bidrag til bygningens energibruk gjennom året. På vinteren vil solinnstrålingen kunne gi et varmetilskudd som vil være gunstig å utnytte. I sommerperioden kan soltilskuddet føre til at rom blir for varme og det kan dermed være nødvendig å stenge solstrålene ute. Bygninger med store glassfasader kan dermed lide av overopphetingsproblemer og et behov for kjøling kan derfor oppstå. Det er viktig å tenke på dagslysnivået ved valg av glass. Lystransmisjonen ved solbeskyttende glass er lavere enn klart glass og dermed vil dagslysnivået i et kontorbygg bli lavere ved samme areal (Erichsen & Horgen AS, 2007). Ønsket om å utnytte dagslys og samtidig beskytte mot solvarme kan derfor bli en motsetning.

4 Doble fasader

4.1 Historikk

Implementasjonen av doble fasader har hatt en økning i anvendelse de siste årene. En dobbelfasade er bygd opp av to fasader med et hulrom imellom, der den ytterste fasaden består av glass. Denne fasadetyperen kan bli brukt på nybygg, men også som rehabilitering av gamle bygg, og kan dermed redusere kostnader for utbedring av eksisterende fasade. Doble fasader er en europeisk arkitektonisk trend som er blitt populær hovedsakelig på grunn av (Poirazis, 2004):

- Det estetiske ønsket om en glassfasade som fører til økt åpenhet
- Det praktiske behovet for forbedret innemiljø
- Behovet for å bedre akustikken i bygninger som ligger i områder med mye støy
- Reduksjon av energiforbruket under driftstid

Konseptet om doble fasader er ikke nytt. Flere eksempler viser at det, i en eller annen form, allerede på begynnelsen av 1900-tallet ble utformet doble fasader på bygg. I følge Poirazis (2004) beskrives det en versjon av ventilert flerfasade så tidlig som 1849. Da var hensikten å sirkulere varm luft mellom to glassfasader om vinteren, mens det om sommeren skulle sirkulere kald luft. Dette kan man se igjen i dagens metode, hvor man vil at hulrommet skal opptre som en termisk buffer. Det var liten fremgang i dobbelfasadekonstruksjon før begynnelsen av 80-tallet, da begynte disse fasadene å bli utformet med hensyn på miljøet (Poirazis, 2004). Det er i de siste tiårene at fokuset på energieffektivitet og miljøhensyn har økt, og det har derfor blitt mer populært med bygninger som kan tilfredsstille disse kravene. Doble fasader ble veldig populære på 90-tallet (Oesterle, 2001) og er i dag en alternativ fasadeløsning i Norge.

4.2 Doble fasader - generelt

Doble fasader gir både arkitektoniske og tekniske muligheter. Ved at doble fasader består av mye glass kan de gi en åpen og gjennomsiktig fasade samtidig som den gir bygningen et preg av nyskapning. De tekniske mulighetene relateres til funksjonen som den doble fasaden har, både som en termisk og akustisk buffer, den gir beskyttelse til solavskjermingssystemet og har en luftgjennomstrømning for den naturlige ventilasjonen. En dobbelfasade består i hovedsak av en ytterfasade i glass som er lagt utenpå den «ordinære» fasaden, med et mellomrom mellom disse (Andresen, 2002). Den ytre fasaden gir beskyttelse mot nedbør og demper inntrenging av lyd og støy (Hollingsbee et al., 2009), og består ofte av et enkelt lags glass.

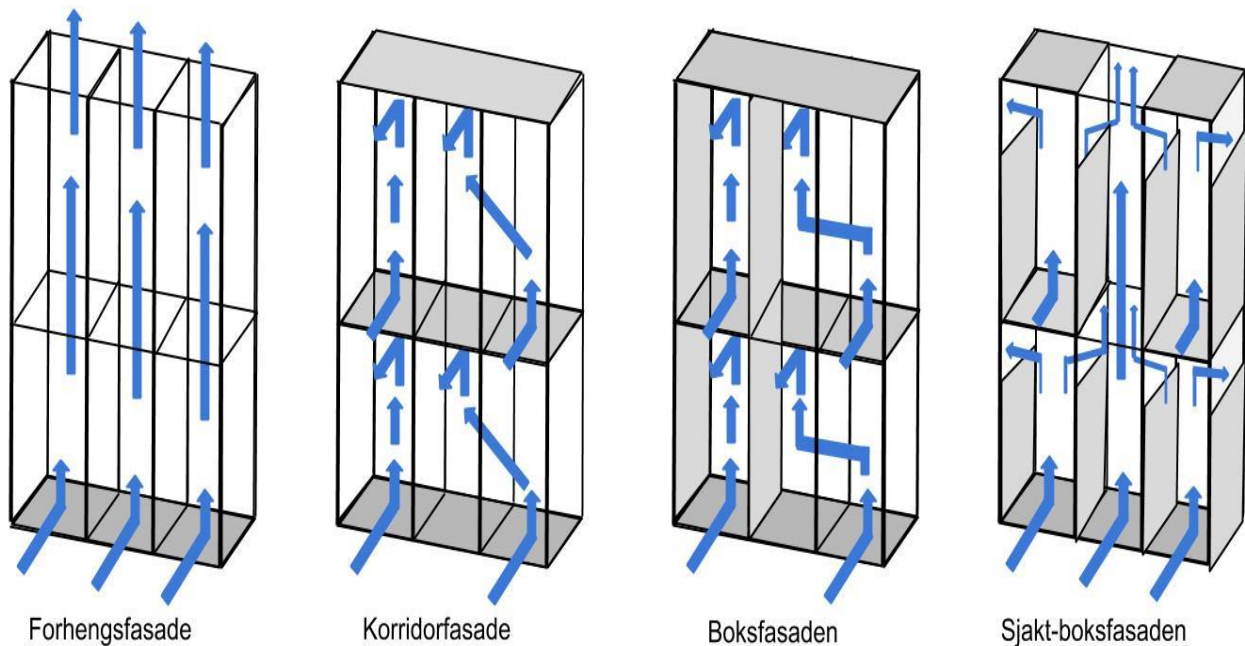
Bredden på mellomrommet varierer fra 0,1 m - 2 m og rommer solavskjerming, samt eventuelt andre tekniske installasjoner som ventilasjonskanaler, kjøleinstallasjoner, eller dagslyssystemer (Andresen, 2002). Hulrommet kan bli brukt til å isolere mot termisk energioverføring mellom ytre omgivelser og bygningen, og for å utnytte solenergi til å varme opp den innkommende luften (Hollingsbee et al., 2009). En justerbar solavskjermingsenhet, slik som persiener eller lameller, er ofte installert i hulrommet. Innerfasaden er helt eller delvis i glass – som regel brukes det to-lags isolerglass eller energiglass, i tillegg har den vanligvis vinduer som kan åpnes (Andresen, 2002). Den innvendige fasaden kan i nybygg dermed gjøres enklere, eller man kan ved rehabilitering beholde eller utbedre fasaden med enkle midler (Haase and Wigenstad, 2010).

4.2.1 Klassifisering av doble fasader

Dobbelfasader kan bygges opp på ulike måter, både etter utforming og ventilasjonsprinsipp.

Utformingen på en dobbelfasade kan deles inn i fire kategorier (Oesterle, 2001) og vises i Figur 12:

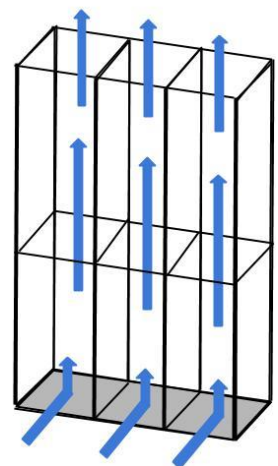
- Forhengsfasader
- Korridorfasader
- Boksfasader
- Sjakt-boksfasader



Figur 12: Oppbygging av dobbelfasader (Oesterle, 2001)

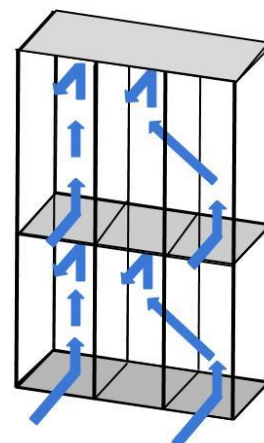
Forhengsfasade

Ved bruk av en forhengsfasade er det verken horisontale eller vertikale oppdelinger for luftstrømmen i hulrommet. Forhengsfasaden går ofte over flere etasjer og rom ved siden av hverandre, og i ekstreme tilfeller kan den strekke seg rundt hele bygget. Den er helt åpen for luftsirkulasjon i alle retninger, noe som gjør at det er vanskelig å hindre lydoverføring og brannspredning i fasaden (Andresen, 2002). Ventilasjonen i hulrommet oppstår ved store åpninger på bakkenivå og ved taket. Den ytre fasaden gir god støydemping fra lyder utenifra, men på grunn av den åpne luftsirkulasjonen er det store muligheter for at lyd i et rom vil kunne overføres til de andre. Lydbølgen reflekteres mot den ytre fasaden og skaper ekko og støy som vil kunne komme inn i nærliggende rom. Det er vanlig at rommene i den indre fasaden er mekanisk ventilert slik at vinduer ikke skal kunne åpnes ut mot hulrommet og slik at lyd fra andre rom skal kunne hindres (Oesterle, 2001).



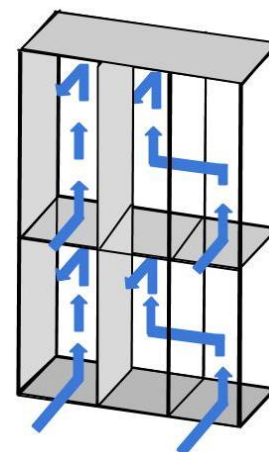
Korridorfasaden

I en korridorfasade er hulrommet mellom fasadene lukket av horisontale skiller mellom hver etasje. Dette hindrer brannspredning og lydoverføring vertikalt, men rom som ligger horisontalt vil kunne være utsatt for lydproblemer og støy. Dersom korridorfasaden går rundt hele bygget kan vifter klare å dra varmluft fra sørsiden til nordsiden og dermed bidra til jevnere og mer behagelig lufttemperatur. I hjørnene på bygningen vil det kunne forekomme store forskjeller i lufttrykket og dette vil kunne resultere i ukomfortable trekk ved vindusåpninger til innerfasaden. Generelt kan dette unngås ved å stenge av hjørnearealene på siden (Oesterle, 2001). I resten av korridoren er det sannsynlig at det bare vil være relativt små forskjeller i lufttrykket og disse kan bli brukt til å støtte den naturlige ventilasjonen. I likhet med forhengsfasaden er denne ganske enkel å bygge siden utformingen ikke krever de mest tekniske løsningene.



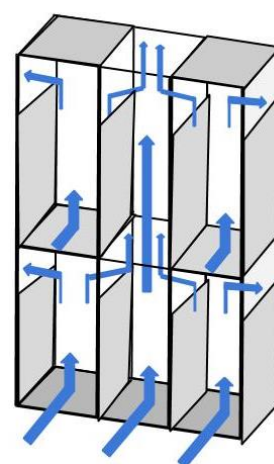
Boksfasaden

«Boksvinduet» er muligens den eldste av tolagsfasaden. Boksfasaden har tette skiller både horisontalt og vertikalt. «Boksen» kan dekke flere rom og/eller etasjer, men vanligvis dekker en «boks» ett rom. På denne måten hindrer man lydoverføring mellom rommene, brannspredning og det blir lettere å takle overopphetingsproblemer. Siden «boksen» dekker ett rom, vil ikke lyden fra ett rom overføres til de omliggende rommene (Oesterle, 2001). I hver boks må det være åpninger for utlufting. Disse må plasseres riktig, slik at ikke avtrekksluften i en boks suges inn i boksen over. Dette er en relativt avansert metode og er dermed også nokså kostbar.



Sjakt-boks fasaden

Sjakt-boks fasaden er en spesiell form for boksfasade. Den er basert på vertikale sjakter som går over flere etasjer for føring av avtrekksluften og «bokser» mellom sjaktene som dekker et rom. I hver etasje så er den vertikale sjakten linket sammen med boksfasadene som ligger over et rom eller sone. Oppdrift sørger for at luften i boksfasaden vil bli trukket inn i de vertikale sjaktene og deretter opp til toppen hvor luften blir dratt ut til omgivelsene (Oesterle, 2001). Vinduene som vender mot avtrekksjakten vil ikke kunne åpnes og dermed begrenser man problemet med lyd- og brannspredning. En ulempe er at det kan bli ganske høye temperaturer i toppen av sjakten og dette kan føre til overopphetingsproblemer i rommene innenfor. Sjakt-boks fasaden krever ikke like mange åpninger i den ytre fasaden, og man kan dermed utnytte de termiske oppdriften i hulrommet bedre (Oesterle, 2001). Det er også mulig å benytte mekanisk ventilasjon i de vertikale sjaktene slik at man ikke skal være like avhengig av temperaturen utenfor.



4.2.2 Ventilasjonsprinsipper for hulrommet i dobbelfasader

Ventilasjon i en bygning kan ha flere funksjoner, men den har to primære formål. Et formål er å opprettholde en akseptabel luftkvalitet, som i hovedsak er basert på tilførsel av frisk luft og fjerning eller fortykning av innendørs forurensning. Det andre er å tilrettelegge for ønskelig termisk komfort uten trekk og store temperaturforandringer i den okkuperte sonen (Kleiven, 2003). I følge Osterle (2001) er ventilasjonsløsningen i dobbelfasaden viktig fordi den i stor grad påvirker energiforbruket i bygningen. Dette energiforbruket er koblet opp mot oppvarming, ventilasjon og kjøling, komfort, luftkvalitet, lydisolasjon og brannsikkerhet. For å kunne disponere frisk luft under driftstid, kan forskjellige typer av ventilasjon for en dobbeltfasade bli anvendt. Her må man ta hensyn til klima, retning, beliggenhet og bygningstype for å minimalisere energiforbruket og bedre komforten til de som oppholder seg i bygget (Shameri et al., 2011). Doble fasader kan bli kategorisert etter dens funksjon, det vil si ventilasjonstype i hulrommet. Ventilasjonen i hulrommet kan være:

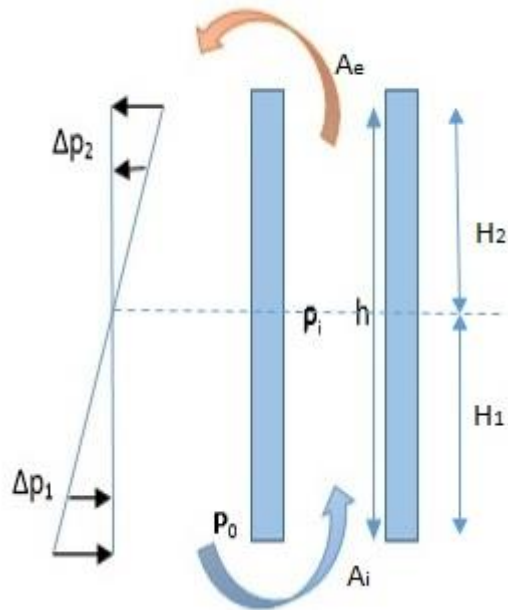
- Naturlig ventilasjon
- Hybrid ventilasjon
- Mekanisk ventilasjon

Prinsippene for naturlig ventilasjon i bygninger forekommer av vind, termisk oppdrift eller begge deler som drivkrefter (Kleiven, 2003). Dobbelfasader er også basert på disse drivkreftene for å kunne benytte seg av den naturlige ventilasjonen. Oppdrift (også kalt skorsteinseffekt) oppstår fordi varm luft er lettere enn kald luft og jo større temperaturforskjell det er mellom inne og ute, desto sterkere blir drivtrykket (Sintef Energiforskning, 2007). I en dobbelfasade vil den termiske oppdriften forekomme av temperaturforskjellen mellom temperaturene på hver side av solavskjermingssystemet, eller på innsiden av den ytre glassfasaden og på utsiden av den indre fasaden. Temperaturforskjellen øker med asymmetrisk solstråling og med transmisjonen gjennom fasaden (Zhou and Chen, 2010). Vindtrykk og hastighet kan også påvirke den naturlige ventilasjonen i hulrommet ved å bedre sirkulasjon av luften (Gratia and De Herde, 2007b).

Ved mekanisk ventilasjon brukes elektrisk drevne vifter for å skape drivtrykk for luften (Sintef Energiforskning, 2007). Viften vil suge den brukte luften ut av bygningen, mens frisk luft strømmer inn gjennom åpninger i fasaden. Dermed blir ventilasjonen uavhengig av uteforholdene.

Hybrid ventilasjon bruker en kombinert form av naturlig og mekanisk ventilasjon. Systemet bruker naturlige krefter, når disse er tilgjengelige, for å redusere forbruket av elektrisitet til viftene. Den tar de positive karakteristikkene fra både naturlig og mekanisk ventilasjonssystem og bruker dem til å få den beste ventilasjonen ut av disse to. For at anlegg med hybrid ventilasjon skal kunne fungere må den motstanden som luften møter være svært liten og det betyr store åpninger og kanaler.

Det kan altså benyttes ulike metoder for å transportere luft, enten ved oppdrift, vind eller mekanisk hjelp. Naturlig ventilasjon som er preget av oppdrift oppstår når det er en tetthetsforskjell mellom inne- og uteluften, som igjen er forårsaket av temperaturforskjeller inne- og utendørs. Forskjell i tetthet skaper trykkforskjeller som trekker luft inn og ut av bygningen gjennom hensiktsmessige plasserte åpninger i bygningsskallet eller den doble fasaden (Kleiven, 2003). I åpningen i nedre del av den doble fasaden presser kald luft seg inn, mens i den øvre delen presser oppvarmet luft seg ut.



Figur 13: Termisk oppdrift i hulrommet med to åpninger (Kleiven, 2003)

Figur 13 illustrerer hvordan trykket inne i den doble fasaden varierer med høyden. Siden det er åpning både oppe og nede i fasaden vil trykket variere, og punktet hvor trykket ute og inne er like kalles for nøytralsonen. Dersom temperaturen på luften innendørs overskrider utetemperaturen, forårsaker det et overtrykk i øvre del av bygningen og et undertrykk i nedre del (Kleiven, 2003). Overtrykket over nøytralsonen driver luft ut gjennom åpningen i toppen og undertrykket under nøytralsonen trekker luft inn gjennom åpninger i bunn. Trykkgradienten fra oppdriftsvirkningen kan finnes fra Ligning 5 (Sintef Energiforskning, 2007), hvor Δp_1 og Δp_2 [Pa] er trykkdifferansen over åpningene, h [m] er høyden mellom åpningene, ρ [kg/m³] er tettheten og g [m/s²] er tyngdeakselerasjonen.

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_1 + \Delta p_2 = (\rho_0 - \rho_1)gh = \Delta \rho gh \\ &= p_0 \left(\frac{273}{T_u} - \frac{273}{T_i} \right) gh \\ &\approx 0,0443 \cdot (T_i - T_u) \cdot h \quad [\text{Pa}] \end{aligned} \quad (5)$$

T_i [K] er temperaturen innendørs og T_u [K] er temperaturen utendørs. Som Ligning 5 viser vil trykkforskjellen bli større når temperaturforskjellen og høyden i den doble fasaden øker. Dersom det er varmere temperatur ute enn inne vil det ikke forekomme oppdrift uten hjelp fra vind eller ved mekanisk hjelp av vifter som kan suge ut den gamle luften. Nøytralsonen i hulrommet kan finnes ved Ligning 6 (Stampe, 2000), hvor h [m] er høyden mellom åpningene, A_i [m²] er innløpsåpningen og A_e [m²] er utløpsåpningen.

$$H_1 = \frac{h}{1+m} \quad [m] \quad (6)$$

$$m = \left(\frac{A_i}{A_e} \right)^2 \quad [-] \quad (7)$$

Vinddrevet ventilasjon skjer som et resultat av forskjellige trykk som presser på bygningskonstruksjonen. Trykkforskjellene driver luft inn i bygningen gjennom åpninger i bygningskallet på vindsiden og driver luft ut av bygningen gjennom åpninger i bygget på le-siden (Kleiven, 2003). Drivkreftene for naturlig ventilasjon, oppdrift og vind, kan enten skje samtidig eller hver for seg. Den dominerende drivkraften ved en rolig kald dag med lite vind vil typisk være termisk oppdrift, mens vind typisk vil være den dominerende drivkraften på grunn av trykkforskjeller en varm vindfull dag (Kleiven, 2003).

Naturlig ventilasjon er i seg selv støyfri, men et unntak er dersom det forekommer sterk vind (Mathisen et al., 2004). Volumstrømmen, q_v [m^3/s], gjennom hulrommet kan forenklet bestemmes av ligning 8 (Stampe, 2000), hvor C_{ai} er åpningsfaktor bestemt av åpningens form. For en skarpkantet åpning er $C_{ai} = 0,6$.

$$q_v = q_{vi} = C_{ai} \cdot A_i \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta t \cdot H_1}{T_i}} \quad [m^3/s] \quad (8)$$

Luftstrømmen er avhengig av vindforhold og fasadens termiske oppførsel og samtidig påvirker hulrommet temperaturfordelingen. Dette utgjør hovedproblemet i å beregne volumstrømmen i hulrommet (Marques da Silva et al., 2015). Hulrommets luftstrømning er ansvarlig for å fjerne varmen i hulrommet men er også selv avhengig av at varme blir fjernet og av vindhastigheten ved innløp- og utløps-åpningene. Ofte vil det forekomme at oppdrift og vind virker sammen, og dermed er det vanskelig å forutsi hvilke luftstrømninger som vil forekomme i hulrommet ved naturlig ventilasjon.

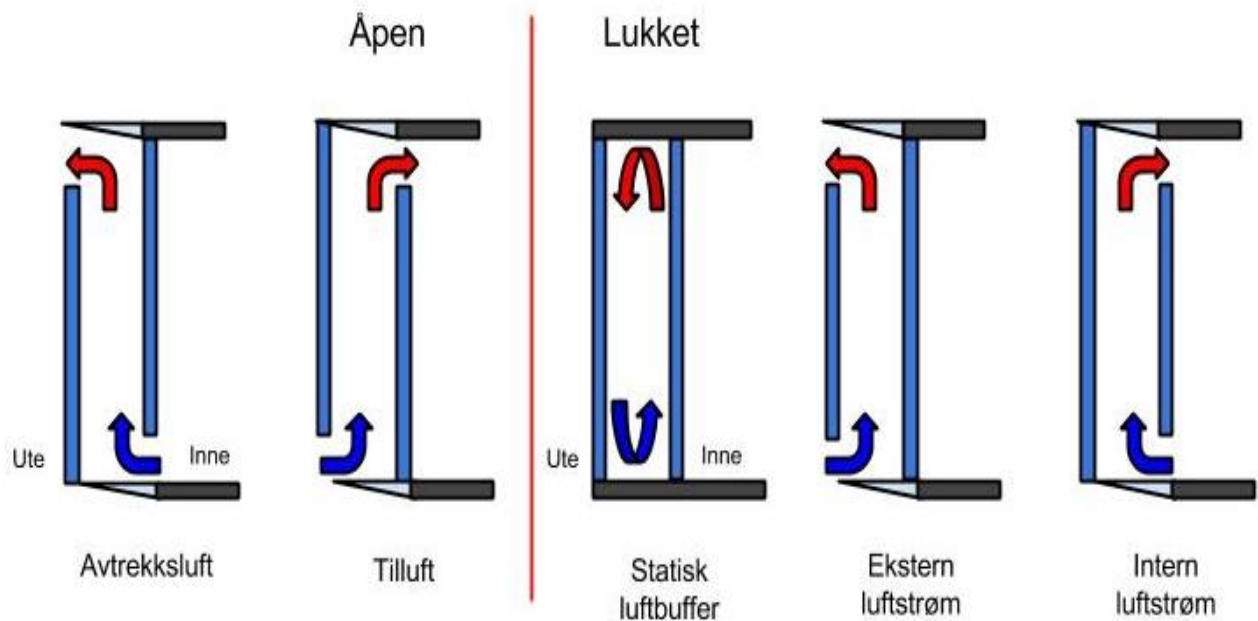
4.2.3 Luftsirkulasjon for dobbelfasader

Dobbelfasader kan også bli kategorisert etter hvilken luftsirkulasjon de er utformet med. Det er flere måter luften i den doble fasaden kan sirkulere på, og det er flere parametere som man må se på før man bestemmer hvilken som passer bygningen best. I følge Oesterle (2001) så burde fri ventilasjon via vinduer bare skje dersom luften på utsiden er av tilstrekkelig kvalitet. Dersom bygningen er plassert i en by nær trafikkryst, eller lignende steder med forurensning, bør dette analyseres før man bestemmer seg for en slik løsning. I tillegg bør ikke vindusventilasjon skje dersom støyen på utsiden av den ytre fasaden stiger over 75dB (A) (Oesterle, 2001).

Det er vanlig å dele dobbelfasader inn i fem ulike kategorier etter hvordan luftsirkulasjonen er (Haase and Wigenstad, 2010):

- Avtrekksluft
- Tilluft
- Statisk lukket buffer
- Eksternt luftstrøm
- Internt luftstrøm

Ulike kombinasjoner av luftsirkulasjon vises i Figur 14.



Figur 14: Ventilasjonsprinsipp for doble fasader (Haase¹ et al., 2007).

Åpen buffer

Ved en åpen buffer vil vinduene i ytterfasaden åpnes for utlufting eller for å utnytte mellomrommet til forvarming av ventilasjonsluft (Haase and Wigestad, 2010). Luften i mellomrommet blir varmet opp av solstrålingen og vil dermed stige. Dersom den frie høyden i dobbelfasaden er for stor kan lufttemperaturen her bli ukomfortabelt høy. Med åpninger i fasaden vil luftstrømmen gjennom hulrommet bli aktivert på grunn av skorsteinseffekten (Ding et al., 2005). På grunn av bransikkerhet og lydoverføring, i tillegg til muligheter for overopphetning, bør den frie høyden begrenses.

Lukket buffer

Ved bruk av lukket buffer vil det ikke være luftveksling mellom oppholdssonen og omgivelsene. Det er vanlig at ytterfasaden har kontrollerbare eller permanente åpninger. På grunn av den ytre fasaden så vil lydisolasjonen mot støy utenfra bedres, og dette er en fordel dersom bygningen befinner seg i et område med mye trafikk eller annen støy. Ved ekstern lukket luftstrøm vil det være to uavhengige systemer for ventilasjonen i oppholdssonen og i hulrommet. Siden det er to uavhengige systemer vil utnyttelsen av solvarmen i den lukkede buffersonen være redusert. Dette er en ulempe da den oppvarmede luften i hulrommet ikke blir utnyttet direkte.

4.2.4 Kostnader

Det er få plasser i litteraturen hvor det står hva det eksakt vil koste å bygge med doble fasader, men det er flere som påpeker at det vil være dyrere sammenlignet med en tradisjonell fasade. Utforming av doble fasader i bygg krever ekstra planlegging og ekstra materiell for å kunne sikre at fasaden er utført på en optimal måte.

Investeringskostnadene er mye høyere for en dobbelfasade enn det er for en tradisjonell fasade. Forskjellen kan ligge på omtrent 60 % - 80 %, selv om den indre fasaden i en dobbelfasade kan ha enklere konstruksjon (Høseggen et al., 2008). I tillegg til høyere investeringskostnader vil kostnadene for vedlikehold og renhold være større i en dobbelfasade enn for en vanlig fasade, da en dobbelfasade inneholder mange flere komponenter og et mye større glassareal. Likevel hvis fasaden er utført og designet på riktig måte, er det mulig å redusere energiforbruket. Dette vil hovedsakelig foregå ved reduksjon av varme, kjøling og ventilasjonen av bygningen og dermed redusere driftskostnadene (Poirazis, 2004). Ifølge Høseggen et al. (2008) så vil ikke energisparingene forsvare

tilleggskostnadene for den doble fasaden, sett fra et økonomisk ståsted. Derfor bør ikke valget om å bygge med dobbelfasade utføres av økonomiske grunner.

Det er ikke valgt å utføre en økonomisk analyse for bygging med doble fasader i denne oppgaven av den grunn at det foreløpig er lite litteratur på dette området. Tidsaspektet strekker ikke til for å gjøre en slik undersøkelse med leverandører og entreprenører på dette punktet. Derimot vil det bli anbefalt som videre arbeidsområde i *kapittel 12 Videre arbeid*.

4.3 Termisk isolasjon

Oppbyggingen til den doble fasaden gjør at hulrommet mellom fasadene skal kunne gi en bedre termisk isolasjon både på sommer- og vinterstid (Oesterle, 2001). Hulrommet vil fungere som en termisk buffer slik at den kan gi varme om vinteren og kjøling om sommeren. En termisk buffer fungerer som en midlertidig lagringsplass som reduserer varme- og kjølelast ved å ta til seg og slippe ut varme. Ligningene presentert i dette delkapittelet er hentet fra boken *ENØK i bygninger; effektiv energibruk* (Sintef Energiforskning, 2007).

4.3.1 Varmeoverføring

Dersom det er en temperaturforskjell mellom to sider av en konstruksjon eller et materiale, vil det alltid gå en varmetransport mot den siden med lavest temperatur. Varme overføres på tre forskjellige måter (Thue, 2012):

- Ledning
- Konveksjon
- Stråling

Varmeledning, også kalt konduksjon, skjer ved at varmen forplanter seg gjennom materialet ved molekylbevegelser. «Varmere» molekyler overfører noen av sin kinetiske energi, gjennom støt, til «kaldere» og mer energifattige molekyler (Sintef Energiforskning, 2007). Dermed vil varmen fra en side av materialet bevege seg gjennom materialet til siden med lavere temperatur og kan deretter overføres til andre materialer. For et homogent materiale uttrykkes Fouriers varmeledningslov for varmestrømmen dQ [Ws] som i Ligning 9, hvor dA er arealet som varmestrømmen beveger seg igjennom, dt er tiden det tar, λ [W/mK] er den termiske varmekonduktiviteten til materialet og $\partial T / \partial x$ er temperaturgradienten gjennom materialet. Den termiske konduktiviteten er avhengig av materialet og angir varmeledningsevnen til materialet.

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dA \cdot dt \text{ [Ws]} \quad (9)$$

Ligning 10 angir varmestrømmen per arealenhet gjennom et plant, homogent materialsjikt, hvor d [m] er tykkelsen på sjiktet, λ [W/mK] er materialets varmekonduktivitet og T_1 og T_2 [K] er overflatetemperaturer.

$$q_1 = \frac{\lambda}{d} (T_2 - T_1) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (10)$$

Varmeisolasjonsevnen til et materiale med tykkelse d [m] og konduktivitet λ [W/mK], uttrykkes i Ligning 11.

$$R = \frac{d}{\lambda} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (11)$$

God eller dårlig isolasjonsevne kan vurderes ut ifra materialets varmekonduktivitet. Dersom materialet har liten λ vil motstanden bli stor og det betyr at varmeisolasjonsevnen er god, men dersom λ er stor vil motstanden bli liten og varmeisolasjonsevnen vil være dårlig.

Overflatekonveksjon er varmeveksling mellom en overflate og det nærliggende luftlaget. Konveksjon skjer ved at fluidet (væsker og gasser) blir varmet opp eller kjølt ned ved en materialoverflate og så blander seg ved omkringliggende fluid ved strømning (Sintef Energiforskning, 2007). For doble fasader vil det bare være konveksjon ved vinduer og i luft som vil ha noen praktisk betydning. For konveksjon skiller det mellom «fri» og «tvungen» konveksjon. Ved fri (eller naturlig) konveksjon er drivkraften til strømmingen bare temperaturforskjellen mellom fluid og overflate, mens det ved tvungen konveksjon er en ytre påvirkning som driver strømmingen. Den konvektive varmeoverføringen mellom luft over et overflateareal er gitt av Ligning 12, hvor h_c [W/m^2K] er konvektivt varmeovergangstall, T_s er overflatetemperaturen [K] og T_f er fluidtemperaturen langs overflaten [K].

$$q_c = h_c \cdot (T_s - T_f) [W/m^2] \quad (12)$$

Overflater i et rom overfører varme med langbølget (infrarød) stråling. På samme måte som lys, er varmestråling elektromagnetiske bølger (Sintef Energiforskning, 2007). Netto varmetransport mellom to parallelle flater ved stråling q_r kan beregnes ut fra Ligning 13, dersom T_1 og T_2 samt emissiviteter ε_1 og ε_2 er kjent. C_{12} er gjensidig strålingstall mellom flatene og β [K^3] er temperaturfaktor. Emissiviteten vil si forholdet mellom den energien som sendes ut fra overflaten og den energien som et svart legeme med samme temperatur ville ha sendt ut (Sintef Energiforskning, 2007). Det er emissiviteten som bestemmer hvor lett en overflate avgir varme.

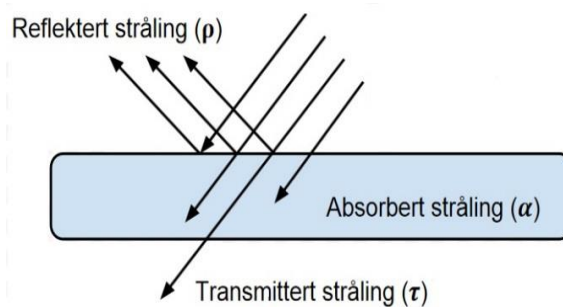
$$q_r = C_{12} \cdot \beta \cdot (T_1 - T_2) [W/m^2] \quad (13)$$

Som Ligning 13 viser vil varmetransporten ved stråling være uavhengig av avstanden mellom flatene. For å finne C_{12} og β må Ligning 14 og 15 brukes. Her er σ er Stefan- Boltzmanns konstant [$5,672 \cdot 10^{-8} W/m^2K$], ε overflatens emissivitet og T_m er midlere temperatur mellom flatene ($0,5 \cdot (T_1 + T_2)$).

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} [W/m^2] \quad (14)$$

$$\beta \approx 4 \cdot T_m^3 \quad (15)$$

Varmen fra solen treffer oss som stråling, og for den energien som avgis vil mengde og bølgelengde avhenge av temperatur og overflateegenskaper (Thue, 2012). Total solstråling som treffer et objekt eller bygning består av direkte og diffus stråling. Diffus stråling er den reflekterte og diffuse himmelstråling som vil treffe objektet etter enten å ha blitt reflektert fra andre overflater eller som har blitt spredt i atmosfæren av for eksempel skyene. Solstråling som treffer en gjennomiktig overflate, slik som et vindu, blir delvis reflektert, noe absorberes i glasslaget og noe transmitteres gjennom flaten og vil deretter treffe interne overflater i rommet og avgi varmen her. Figur 15 illustrerer i prinsipp hvordan solstrålingen som treffer et vindu fordeles.

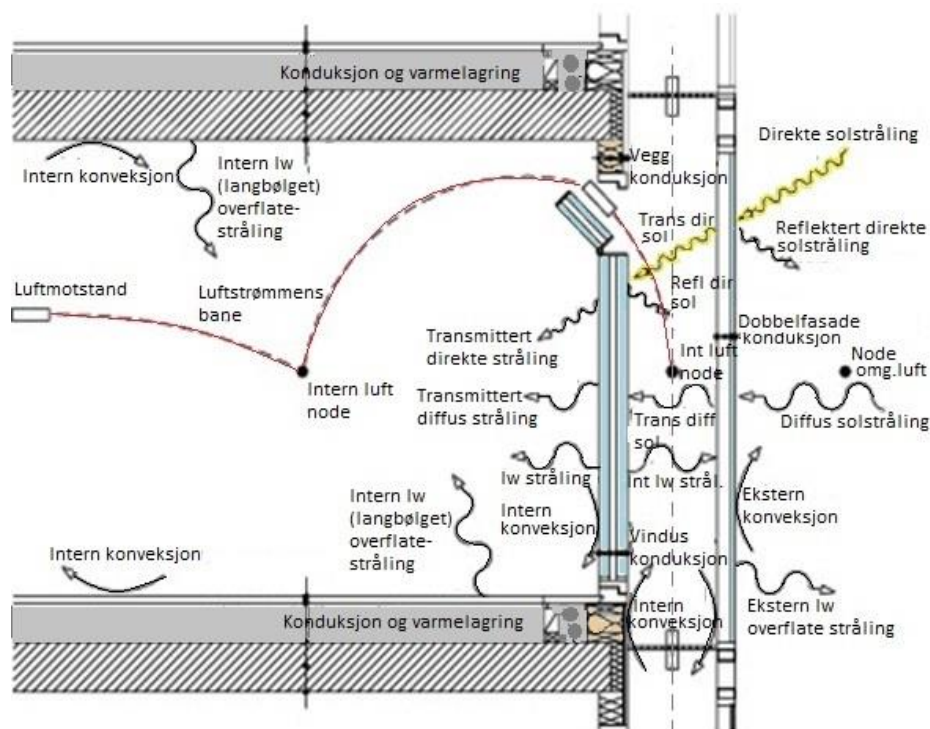


Figur 15: Fordeling av den samlede strålingen mot en overflate

Fordelingen av den samlede strålingen kan uttrykkes ved reflektert, absorbert og transmittert stråling og vises i Ligning 16.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (16)$$

Varmeoverføring skjer altså på mange måter, og vil være viktig å ta hensyn til når varmebalansen i en bygning eller et rom skal evalueres. Figur 16 viser et tverrsnitt av et rom med doble fasader og hvilke varmeoverføringsprosesser som vil være involvert. Figuren tar for seg varmeoverføringen uten interne laster og ventilasjon, da disse ville komplisere situasjonen enda mer. Varmebalansen i en bygning med doble fasader er avhengig av alle disse parameterne, og et varmesystem i bygningen skal kompensere for varmetap og opprettholde komforten.



Figur 16: Tverrsnitt av et rom med dobbelfasade som viser involverte varmeoverføringer (Høseggen et al., 2008)

U-verdi, varmegjennomgangskoeffisient

Selv om temperaturdifferanse alltid vil føre til transport av varme kan varmemengden som unnslipper på denne måten begrenses sterkt ved god isolasjon. Varmetransporten gjennom en sammensatt konstruksjon ved parallelle, homogene sjikt, for stasjonære temperaturforhold vises i Ligning 17, hvor R_T er konstruksjonens samlede varmemotstand [m^2K/W] og T_i og T_e er temperaturen på hver side av konstruksjonen.

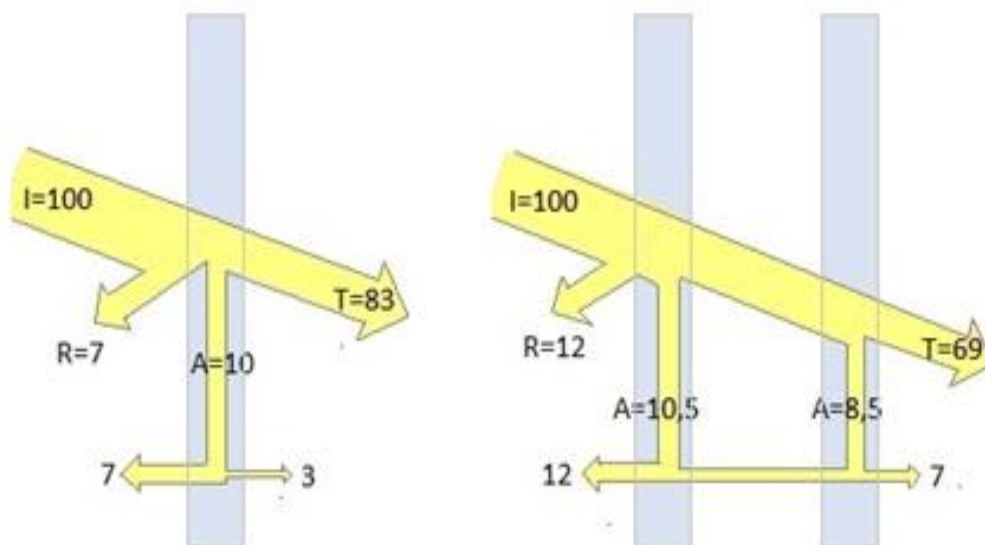
$$q = \frac{1}{R_T} (T_i - T_e) [W/m^2] \quad (17)$$

Varmegjennomgangskoeffisienten, U, er konstruksjonens evne til varmeisolasjon og gir et uttrykk for varmeledningsevnen til en bygningsdel. U-verdien i en bygningsdel er avhengig av konstruksjonens sammensetning og hvilke materialer som er brukt. Den inverse av totalmotstanden er da U-verdien og vises i Ligning 18.

$$U = \frac{1}{R_T} [W/m^2K] \quad (18)$$

Ved bruk av doble fasader vil en stor del av bygget være i glass, og man kan se på denne den ytre fasaden som mange store sammenhengende vinduer. Ved at den ytre fasaden er av glass kan den slippe inn dagslys og formidle visuell kontakt mellom inne og ute. Vinduer og glassfasader har større transmisjonstap enn godt isolerte vegg- og tak partier, og gjennom solvarme tilfører de bygningen store mengder av energi (Sintef Energiforskning, 2007). En glassfasade, slik som vinduene, vil dermed ha stor betydning på energibalansen for en bygning.

For sollys angir lystransmittans og lysrefleksjon forholdet mellom sollys (overført og reflektert), og den totale mengden av sollys som treffer glasset (Statens byggeforskningsinstitut, 2006). Figur 17 illustrerer hvordan reflektans, absorpsjon og transmittans avhenger av innfallende stråling og oppbyggingen av vinduet. Her kan man se at den totale strålingstransmittansen er forskjellig ved bruk av ett- og tolagsruter. Total strålingstransmittans er 86 % for ettlagsruten (83 % + 3 %) og 76 % for tolagsruten (69 % + 7 %). Grunnen til at strålingstransmittansen er forskjellig er at ved en tolagsrute så må man også regne med varmemotstanden i spalten mellom glassene, og dermed blir varmeovergangsmotstanden høyere. Høyere motstand gir lavere U-verdi og dermed bedre isolasjon.



Figur 17: Ettlagsrute og tolagsrute av vanlig klart glass. Fordeling av solstråling (Statens byggeforskningsinstitut, 2006)

Varmemotstanden i spalten avhenger blant annet av temperaturforskjellen over spalten, middeltemperaturen i spalten og emissiviteten (Sintef Energiforskning, 2007). For å få en høyere varmemotstand kan man legge til flere glass eller man kan redusere emissiviteten i glasset. Dersom antall glass øker vil også antall spalter øke i takt, dette gir økt varmemotstanden avtagende U-verdi. Det samme skjer dersom man redusere emissiviteten for glassflater inn mot en spalte, da vil spaltemotstanden øke og U-verdien bedres.

Kondens

Et problem i dobbelfasade-konseptet er at det kan oppstå kondens både på utsiden og innsiden av den ytre glassfasaden. Kondens kan oppstå på en flate når denne er kaldere enn lufta omkring, og dersom det er tilstrekkelig fuktighet i lufta. Hvis det i tillegg eksisterer kritisk fuktforhold inne i dobbelfasaden, kan dette medføre innvendig kondens (Haase and Wigenstad, 2010). Dette fenomenet er forårsaket av underkjøling av den ytre glassfasaden og avhenger av en kombinasjon av en rekke klimaforhold som uteluftens temperatur, omgivelsenes strålingstemperatur, relativ fuktighet og vindhastighet. Når den fuktige luften avkjøles så mye at den ikke lengre kan holde på fuktigheten oppstår det kondens på glassoverflatene. Ved høy luftfuktighet om natten er temperaturforskjeller mellom omgivelsene og glassoverflaten den viktigste årsaken til kondens (Hien et al., 2005). Før kondensen oppstår kan bruk av vifter være med på å forhindre at det oppstår fuktighet i hulrommet.

Selv om kondens vil kunne oppstå i den doble fasaden, er det ikke valgt å ta hensyn til eller omtale dette i denne rapporten på grunn av tidsaspektet. Derimot vil det bli anbefalt som videre arbeidsområde.

4.3.2 Åpninger i den doble fasaden

Temperaturen på luften i hulrommet er påvirket av mange faktorer, blant annet solstråling, utetemperatur, vindhastighet, åpninger i fasaden, glasstype og solavskjermingssystem (Gratia and De Herde, 2007a). Fjerningen av varme fra et rom eller fra hulrommet i den doble fasaden kan være et viktig kriterium for dimensjonering av åpningene i den doble fasaden. Når det er vindstille ute og man opererer med naturlig ventilasjon i hulrommet, kan luftvekslingen i hulrommet, som tidligere nevnt, bare være påvirket av termisk oppdrift.

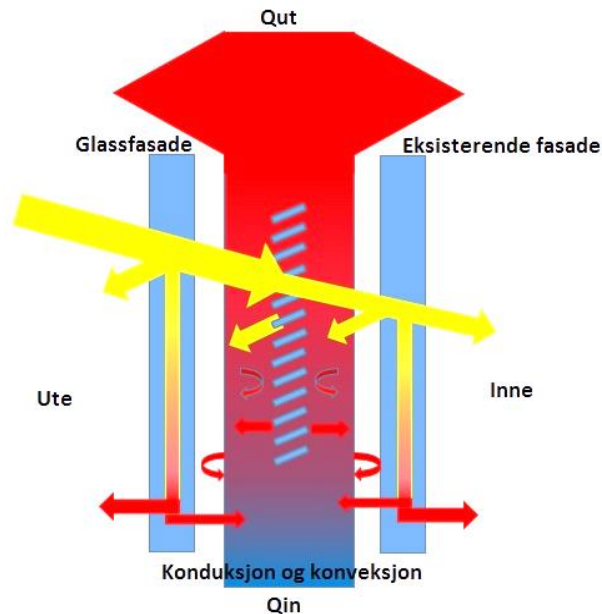
For doble fasader må alle typer varmeoverføringsmekanismer bli tatt i betraktning da de oppstår både samtidig og overlapper med hverandre (Oesterle, 2001). For hulrommet i dobbelfasaden kan det skilles mellom ventilerte (åpne) og uventilerte (lukkede) spalter. Ofte er luftspaltens viktigste funksjon å ventilere bort fukt og eventuelt begrense virkningen av kraftig inn- eller utstråling på en ytterflate.

Dersom hulrommet er en lukket statisk buffer vil luftspalten fremstå som uventilert. For en uventilert luftspalte vil den samlede varmestrømmen være et bidrag av ledning (q_l), konveksjon (q_k) og stråling (q_r) slik som vist i Ligning 19.

$$q_{tot} = q_l + q_k + q_r \quad [W/m^2] \quad (19)$$

Den totale varmemotstanden i en dobbelfasade vil øke enda mer enn for en tolags-rute da hulrommet vil fungere som en ekstra motstand. I tillegg vil solavskjermingen i den doble fasaden, som er plassert i hulrommet, kunne stenge ute mye av solinnstrålingen og redusere noe av oppdriften på den naturlige ventilasjonen.

Et uventilert luftrom kan føre til høye temperaturer i hulrommet, som igjen kan bidra til overopphetning i sonene bak den doble fasaden. Dersom hulrommet er lukket fra omgivelsene og sonene, vil temperaturen her stige kraftig ved mye solinnstråling. Da det ikke vil være mulighet for å fjerne den varme luften i hulrommet på noe måte og høye temperaturer vil dermed kunne oppstå. I en ventilert luftspalte vil motstanden avhenge av hvilken grad ventilasjon luftspalten har, her skilles det mellom litt ventilerte- og godt ventilerte luftspalter (Norsk Standard, 2008). Ved bruk av et ventilert hulrom vil det hele tiden komme inn frisk luft nederst, denne varmes opp og stiger mot toppen som vist i Figur 18.



Figur 18: Solinnstråling og varmfordeling gjennom en dobbelfasade (Haase, 2011)

Torres et al. (2007) så på hvordan størrelsen på åpningene mellom omgivelsene og hulrommet i den doble fasaden påvirker luftgjennomstrømningen i hulrommet. Resultatet var at større åpninger hjalp til å trekke ut den varme luften av hulrommet siden det oppstod høyere luftstrømninger. Gratia and De Herde (2007a) så i sine simuleringer at hulrommets reduserte temperatur ikke varierte lineært med størrelsen på åpningene fra omgivelsene til hulrommet.

4.3.3 Solavskjerming

Selv i Norge gir sola 1500 ganger mer energi enn det som brukes, og dette er en kilde som kan utnyttes ved bruk av doble fasader. Både for å kunne utnytte og skjerme for solinnstrålingen er solavskjerming en viktig teknisk installering. Solavskjermingssystemet kan gi en betydelig reduksjon i kjølebehovet, forbedre den termiske komforten og redusere potensiell blinding (Wall and Bülow-Hübe, 2003). Et solavskjermingssystem må kunne kontrollere solvarmen for å redusere energien som trengs for kjøling, og på samme tid kontrollere innendørs dagslys og unngå blinding. Fasaden bør utformes på en slik måte at den ikke hindrer dagslys i å slippe inn på overskyede dager. Grunnet store variasjoner i dagslys vil dette være viktig for innklimaet og det er derfor nødvendig å finne en løsning som gir balanse mellom solavskjerming og dagslys. TEK 10 stiller minstekrav til solfaktor for bygninger med kjølebehov.

Solavskjermingen kan plasseres innvendig, i hulrommet eller utvendig. Dersom solavskjermingen plasseres utvendig vil den ikke være beskyttet mot vær og vind, dermed vil solavskjermingssystemet være utsatt for ytre påvirkninger som kan redusere driftstid og vedlikehold. Fordelen med en ytre solavskjerming er at den stopper solinnstrålingen før den har kommet inn i bygget, i motsetning til en innvendig solavskjerming. Innvendig solavskjerming er mye brukt i næringsbygg, men studier viser at solenergien samles opp i solavskjermingen og at det dermed vil bli høye temperaturer på den innvendige flaten av avskjermingsanlegget (Gedsø et al., 2013). Fra et energiperspektiv er den verste innstalleringen av solavskjermingssystemet på innsiden av rommet (Stec and Paassen, 2005). Kjølebehovet vil variere etter plassering og farge på solavskjermingssystemet samt hvor åpningen i dobbelfasaden befinner seg (Gratia and De Herde, 2007c).

En dobbelfasade, med en mellomliggende solavskjerming, vil beskytte solavskjermingsanlegget både mot vind og andre klimapåvirkninger. Et mulig resultat av en solavskjerming mellom to fasader, kan

være lengre drift av avskjermingsanlegget under forhold med sterk sol og vind. Når solavskjermingssystemet plasseres i midten av hulrommet vil den dele hulrommet i to. Posisjonen til solavskjermingssystemet spiller derfor en rolle for varmetilførselen i det mellomliggende rommet samt bygningen (Poirazis, 2004). Et mindre volum vil til en større grad varmes opp enn et større volum. Dersom solskjermen ligger like foran den innerste fasaden, kan luften foran vinduet og den innerste fasaden varmes opp betraktelig (Poirazis, 2004). Dette vil føles ubehagelig for personer innenfor den doble fasaden uansett om vinduet er åpen eller lukket. Når det er lukket vil en varmestrøm varme opp vinduet og luften innenfor, dersom vinduet er åpent vil det være en direkte innstrømning av oppvarmet luft, en situasjon som er enda verre enn den første (Oesterle, 2001). Solavskjermingen har en betydelig påvirkning på den termiske ytelsen samt luftstrømningen i hulrommet (Iyi et al., 2014).

Gratia and De Herde (2007b) gjorde et studie på hvilken farge og plasseringen av solavskjermingssystemet som gav lavest kjølebehov. Studien viste at mellomliggende plassering samt lys farge gav det minste kjølebehovet i en dobbelfasade. Andre studier viser at solavskjermingssystemet bør plasseres i den ytre delen av hulrommet, men den bør ikke plasseres for nærme det ytterste glasset heller for å unngå overdreven oppvarming og termisk belastning på denne fasaden. Den ideelle posisjonen er, ifølge Poirazis (2004), omtrent en tredjedel av fasaderommet ut mot den ytterste fasaden, med god ventilasjon til det ytre rommet både over og under solavskjermingen.

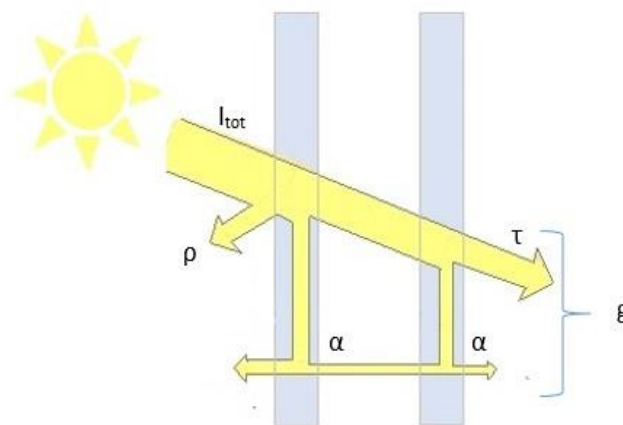
g-verdi

Den totale transmisjonen av solenergi gjennom solavskjerming og glass betegnes som g_{tot} vist i Figur 19 og kan beregnes fra Ligning 20. Q_{sol} (total transmittert solenergi) divideres på produktet av global stråling på vinduet I_G , og området av vinduet A_w .

$$g_{tot} = \frac{Q_{sol}}{I_G \cdot A_w} \quad (20)$$

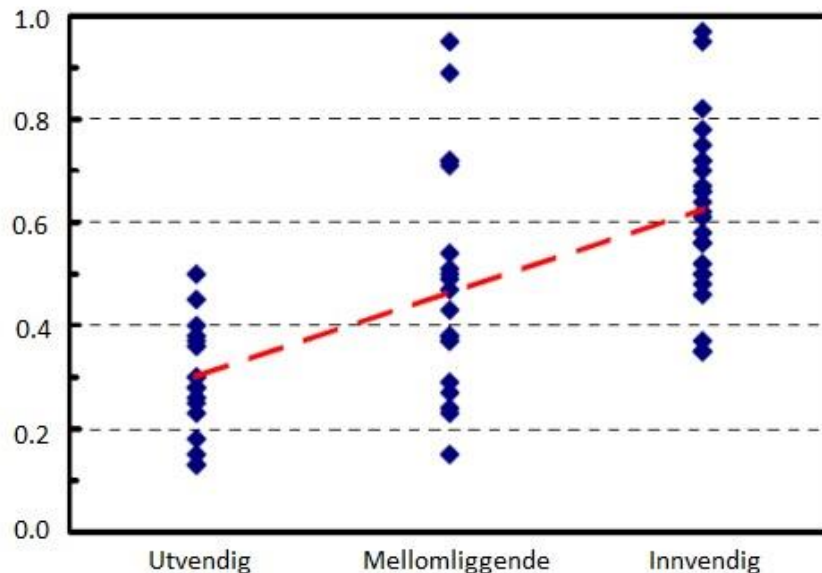
Transmittansen av solenergi for en viss solavskjerming kan beregnes på forskjellige måter, hvor den enkleste måten vises i Ligning 21. Her antas det at den totale transmisjonen er produktet av transmittansen for de forskjellige delene av systemet, og dermed løse g-verdien for solavskjermingen.

$$g_{solskjerming} = \frac{g_{tot}}{g_{vindu}} = \text{"solfaktor"} \quad (21)$$



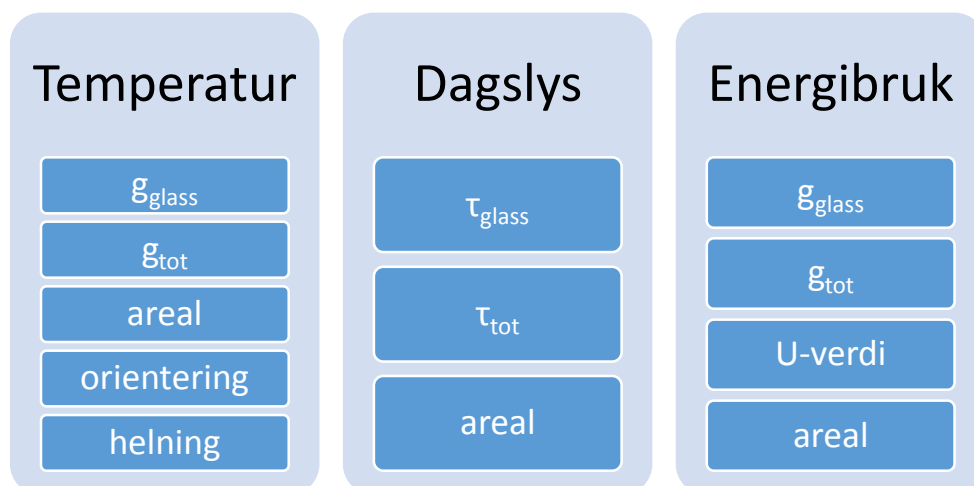
Figur 19: Solinnstråling gjennom et to-lags vindu, g-verdi

Total solfaktor for glass/vindu og solavskjerming (g_{tot}) vises i Figur 19 og skal være mindre enn 0,15 på en solbelastet fasade, med mindre det kan dokumenteres at bygningen ikke har kjølebehov. Anbefalt g -verdi for glass ($g_{glass} \leq 0,45$) (Lovdata, 2010). g -verdien er en sammensetning av transmisjon, refleksjon og absorpsjon. Strålingen som reflekteres av solavskjermingssystemet vil påvirke g -verdien for det totale systemet. Figur 20 illustrerer at g -verdien for persiennene varierer mye etter hvilken plasseringen solavskjermingssystemet har. Utvendig plassering av persiennene gir lavest g -verdi, mens g -verdien vil være størst for innvendig plassering.



Figur 20: Målte g -verdier for utvendig, mellomliggende og innvendig plassering av solavskjermingssystemet med persiennene (Wall and Bülow-Hübe, 2003)

Det er viktig å se sammenhengen med bruk av solavskjerming sammen med egenskapene i de valgte glassene. Glassegenskaper som påvirker temperatur, dagslys og energibruk i rom er oppgitt i Figur 21 (Erichsen & Horgen AS, 2007).



Figur 21: Glassegenskaper som påvirker temperatur, dagslys og energibruk i rom (Erichsen & Horgen AS, 2007)

4.4 Inneklima

Et godt inneklima i bygninger er viktig for god helse, trivsel og produktivitet. Det er flere fysiske parametere som påvirker kvaliteten på innendørsklimaet, eksempler på dette er temperaturen på luften, opplevelsen av trekk, lukt i rommet og lyssettingen (Nilsson, 2003). Mulige innemiljøproblemer kan påvirke menneskers komfort, menneskers helse, produktivitet og arbeidsmiljø (Nilsson, 2003). Begrepet inneklima er ifølge verdens helseorganisasjon, WHO, definert som en komposisjon av fem hovedelementer (World Health Organization, 1948):

- Termisk miljø (menneskets varmebalanse, termisk komfort)
- Atmosfærisk miljø (forurensninger, gasser, damper, fibre og partikler)
- Akustisk miljø (hørsel, persepsjon, lydpåvirkning og støy)
- Aktinisk miljø (lys, radon, stråle-, bølge-, og feltfenomener)
- Mekanisk miljø (følesans og smerteopplevelse, ergonomi og ulykker)

Inneklima og innemiljø er to begreper som i dag brukes om hverandre. Innemiljø omfatter disse fem hovedelementene som inneklima består av, samt estetisk og psykososialt miljø (Sintef Energiforskning, 2007)

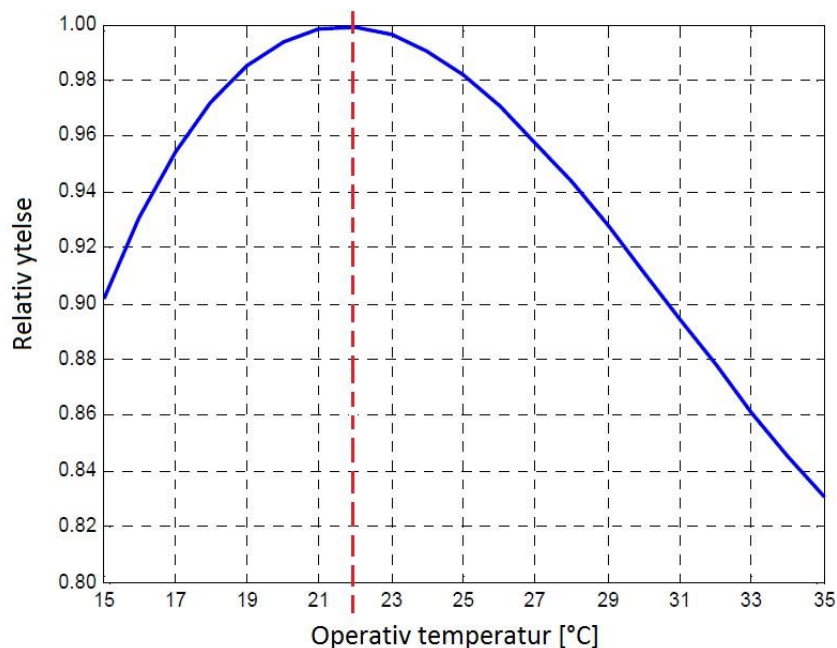
- Estetisk miljø (det som vanligvis oppfattes som behagelig for øye, øre, nese og smak)
- Psykososiale miljø (forholdet til medarbeidere, kolleger og bedriftsledelse)

Doble fasader byr på spennende muligheter til å påvirke noen av disse faktorene og dermed redusere energiforbruket og oppnå et godt innendørsklima. I denne oppgaven er det valgt å se nærmere på de fire første punktene; termisk, atmosfærisk, akustisk og aktinisk miljø.

4.4.1 Termisk miljø

Termisk komfort er en subjektiv følelse eller sinnstilstand (Nilsson, 2003). Hvordan en person opplever og påvirkes av den termiske komforten avhenger av lufttemperaturen, termisk stråling, relativ fuktighet, aktivitetsnivå, oppholdstid og bekledning, samt alder og kjønn. Man kan derfor se at den termiske komforten bestemmes ut i fra fysiologiske og psykologiske kriterier, altså hvordan man opplever omgivelsene (Sintef Energiforskning, 2007). Det termiske inneklimaet omfatter de parameterne som har innflytelse på menneskets varmebalanse og kan beskrives ved hjelp av luftens temperatur, hastighet og fuktighet samt strålingsutveksling med omliggende flater. Vi kan definere termisk komfort som en sinnstilstand der vi uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelser (Norsk Standard, 2005).

Forholdet mellom inneklima og helse er dokumentert i en rekke rapporter, hvor mange konkluderer med at betydelig mengder med penger går tapt hvert år på grunn av dårlig inneklima (Høseggen, 2008). I rom for varig opphold skal det termiske klimaet tilrettelegges ut fra hensyn til helse og tilfredsstillende komfort for tiltenkt bruk av rommet (Lovdata, 2005). De økonomiske tapene er i relasjon med termisk komfort knyttet opp mot ytelse og produktivitet. Resultater fra flere studier på ikke-industrielle bygninger viser at ytelse øker med temperaturer opp mot 21-22 °C og minker med temperaturer over 23-24 °C (Høseggen, 2008).



Figur 22: Relativ ytelse vs. operativ temperatur (Seppänen, 2006)

Basert på rapporter fra 24 studier med forskjellig vektning på arbeidsmiljø, påkledning og personlige faktorer for kontorarbeid, viser Figur 22 det sammensatte forholdet mellom ytelse og temperatur oppgitt av Seppänen (2006). Den røde horisontale streken viser at produktiviteten er høyest når temperaturen er rundt 22 °C.

I TEK 10 anbefales det at lufttemperaturen så langt som mulig holdes under 22 °C når det er oppvarmingsbehov, altså en temperatur som er i samhandling med studiene gjort om produktivitet. Tabell 2 viser anbefalte verdier for operativ temperatur fra TEK 10.

Tabell 2: Anbefalt operativ temperatur, TEK 10

Aktivitetsgruppe	Lett arbeid	Middels arbeid	Tungt arbeid
Temperatur [°C]	19-26	16-26	10-26

Lufttemperaturen beskriver temperaturnivået i et rom og den er også det viktigste målet for termisk inneklima. Lufttemperaturen endrer seg ved ulike høyder over gulvet, og vertikal temperaturgradient er et mål på hvor raskt dette skjer. Den vanligste klagen på grunnlag av det termiske miljøet i et kontorbygg er på grunn av trekk (Nilsson, 2003). Andre lokale termiske ubehag kan forårsakes av asymmetrisk strålingstemperatur, vertikal lufttemperaturgradient og høy eller lav gulvtemperatur (Nilsson, 2003). Det er ikke nødvendig å kreve et statisk og konstant innendørsklima for å oppnå komfort. Hvis det termiske kontrollsystemet klarer å opprettholde en termisk nøytral tilstand på de som oppholder seg i rommet, så vil man kunne oppnå en følelse av termisk komfort.

Arbeidet til P.O Fanger viser en sammenheng mellom gjennomsnittsvurdering av inneklimaet (PMV) og andel misfornøyde (PPD) (Krog et al., 2003). PMV-verdien forutsier altså middelvurderingen på hvordan mennesker føler seg i det termiske miljøet. Den består av en 7-punktsskala fra -3 til 3 for å finne ut hvordan personene oppfatter det termiske miljøet, hvor 0 indikerer nøytralt, mens -3 er kaldt og 3 er varmt. PPD gir et anslag i prosent over hvor mange personer i en større gruppe som er misfornøyde med det termiske klimaet i et gitt tilfelle. Fangers grunnleggende forutsetning var at

termisk komfort er definert i forhold til den fysiske tilstanden av kroppen heller enn de termiske omgivelsene, det vil si at det man faktisk føler er kroppstemperaturen og ikke lufttemperaturen. Under forutsetning av forskjellige kriterier for PPD og PMV fastsettes det forskjellige kategorier for inn klima (Norsk Standard, 2007a). Anbefalte områder for PPD-verdier er gjengitt i Tabell 3 fra NS-EN 15251:2007.

Tabell 3: Termisk tilstand for hele bygningen, anbefalte områder for PPD-verdier

Kategori	Termisk tilstand for hele bygningen	
	PPD [%]	Forventet middelvei
I	< 6	- 0,2 < PMV > + 0,2
II	< 10	- 0,5 < PMV > + 0,5
III	< 15	- 0,7 < PMV > + 0,7
IV	> 15	PMV < - 0,7; eller + 0,7 < PMV

Temperaturen som personer opplever og dermed definerer som behagelig er et gjennomsnitt av lufttemperatur og den gjennomsnittlige temperaturen på flater rundt oss med vekt på hvor stor del av kroppens horisont flatene opptar. På dager med lav utetemperatur kan vindusflatene fungere som store kjøleflater og siden kald luft er tyngre enn varm luft vil denne synke ned mot gulvet. Dette kan forårsake ubehag hos de som sitter i nærheten. En dobbelfasade vil som oftest ha et stort glassareal og personer som sitter tett på glassflater krever altså høyere lufttemperatur for å opprettholde en bestemt operativ temperatur. Det som kan oppstå da er at byggets kjerne kjøles mens yttersiden mot vinduene varmes opp (Erichsen & Horgen AS, 2007). Siden luften i hulrommet er varmere, sammenlignet med utendørstemperaturen i en varmeperiode, så kan den interne delen av fasaden opprettholde temperaturer som er tettere til et nivå for termisk komfort i forhold til en enkelt fasade (Poirazis, 2004). På sommeren er det veldig viktig at systemet er riktig prosjektert slik at temperaturer inne i hulrommet ikke vil øke dramatisk. Dersom den doble fasaden for eksempel ikke inneholder solavskjerming, kan den på dager med mye solinnstråling gi uakseptabel høy operativ temperatur for de som oppholder seg innendørs.

4.4.2 Atmosfærisk miljø

Atmosfærisk miljø består av luftforurensning og opplevd luftkvalitet. Luften innendørs inneholder alltid partikler, både i større og mindre mengde. Luftkvaliteten i en bygning må være tilfredsstillende både med hensyn til lukt og forurensning. I følge TEK 10 skal luften innendørs ikke inneholde forurensning i slike mengder at det er til irritasjon eller kan være skadelig for menneskers helse. Når ventilasjonssystemet skal dimensjoneres, må det tas hensyn til type rom, interiør, utstyr, forurensning fra materialer og mennesker.

For ventilasjon i byggverk for publikum og arbeidsbygninger så skal den gjennomsnittlige frisklufttilførselen være minimum 2,5m³ pr. time pr. m² gulvareal når bygningen eller rommene er i bruk og minimum 0,7 m³ pr. time pr. m² når det ikke er i bruk (Lovdata, 2010). En person produserer mellom 15 og 20 liter karbondioksid (CO₂) per time ved utånding (Direktoratet for byggkvalitet, 2011). Konsentrasjonen av CO₂ i et rom avhenger av hvor mange personer som er tilstede, aktivitetsnivået, hvor stort rommet er og ventilasjonssystemet. CO₂-konsentrasjonen er vanligvis spesifisert som ppm («parts per million»), mg/m³ eller av volumprosent (vol%). Vanlig konsentrasjon i uteluften ligger på ca. 400-450 ppm (Direktoratet for byggkvalitet, 2011). Friskluftkravet per person

med et aktivitetsnivå lik kontorjobb er typisk mellom 25-35 m³/time. Dette vil gi et CO₂-nivå under 1800 mg/m³. I et rom med mange mennesker og dårlig ventilasjon vil CO₂ nivået være høyere.

Ved noen utforminger av den doble fasaden har man mulighet til å åpne vinduene ut til hulrommet slik at man på den måten kan hente inn friskluft fra omgivelsene. Ifølge Oesterle (2001) så burde fri ventilasjon via vinduer bare skje dersom luften på utsiden er av tilstrekkelig kvalitet. Dersom bygningen er plassert i en by nær trafikkkryss, eller lignende steder med forurensning, bør dette analyseres før man bestemmer seg for en slik løsning. Dersom støvpartikler og andre forurensninger kommer inne gjennom vinduene vil dette være med på redusere luftkvaliteten i rommene.

4.4.3 Akustisk miljø

Det akustiske miljøet har betydning for hvordan støynivået og samtaler innendørs oppleves. For å oppnå god trivsel og helse på arbeidsplassen er akustikk og lydforhold viktig, og da dreier det seg hovedsakelig om lydoppfattelse, vibrasjoner, støy, lydoverføring og etterklangstid. Lyd er lydbølger i luft som kan oppfattes av det menneskelige øret og kalles derfor luftlyd. Lyd kan også bre seg gjennom faste stoffer eller materialer og bygningsdeler og kalles da for strukturlyd. Det akustiske miljøet i en bygning påvirker helse, kommunikasjon og produktivitet. Det viktigste er å kunne skape så gode høremessige forhold som mulig i de forskjellige rommene i en bygning (Thue, 2012).

For en bygning er det flere faktorer som det må tas hensyn til for det akustiske miljøet innendørs. I et rom er lydmiljøet avhengig av akustikk, etterklangstid, romvolum, romform, bakgrunns- og ventilasjonsstøy. Støy er definert som uønsket lyd, altså lyd som man ikke ønsker å høre, enten den er sterk eller svak (Thue, 2012). En lydkilde sender vanligvis ut lyd i alle retninger og dermed vil noe lyd reflekteres og noe absorberes i begrensingsflatene. Noe av lyden vil også forsvinne ut åpninger i fasaden, som gjennom åpne dører eller vinduer. Det finnes lovbestemte forskrifter relatert til lydisolasjon og støy og det er derfor viktig at anlegg i rom og summasjon av støy fra ulike anlegg ikke overstiger kravene for grenseverdien som er satt i disse forskriftene. Den økende trafikken i byene i dag er en av hovedårsakene til den økende trafikkstøyen i bygningene som er plassert i sentrum. Støynivået i bygningene blir bestemt av faktorer som (Oesterle, 2001):

- Avstand fra veien til fasaden
- Avstand fra nærmeste trafikkløp
- Veiens oppbyggingen og struktur
- Antall kjøretøy per time i høysesonger og gjennomsnittlig tall per dag
- Hastigheten til kjøretøyene
- Andel av tunge kjøretøy

Den doble fasaden skal kunne gi god lydreduksjon og skjerme fra uønsket støy fra trafikk og andre støykilder som kommer fra omgivelsene utendørs. Hvor åpen fasaden er i mellomrommet og hvor god kvaliteten på glasset er, bestemmer hvor god støyreduksjonen er. Et problem som kan oppstå ved bruk av doble fasader er den reflekterende støy fra rom i nærheten. Lydbølgen reflekteres mot den ytre fasaden og skaper ekko og støy som vil kunne komme inn i nærliggende rom.

Brukerundersøkelsen som ble gjort i Rådhuset på Hamar viste at brukerne var veldig fornøyd med effekten som den doble fasaden hadde på støydempingen (Kleiven and Aschehoug, 2005).

4.4.4 Aktinisk miljø

Det er valgt å ha hovedfokus på lys og dagslysforhold når det skal sees nærmere på det aktiniske miljøet i bygget. Det har vist seg at gode lysforhold er viktig å opprettholde god helse og brukerkomfort i byggene (Erichsen & Horgen AS, 2007). Nok dagslys kan i tillegg være med på å redusere behovet for innendørs belysning og dermed spare energien i bygget. Lystransmisjonen gjennom et vindu eller glassfasade bør generelt være så høy som mulig, men er typisk den dobbelte av g -verdien. Solbeskyttende glass har lavere lystransmisjon enn klart glass og dermed vil samme areal kunne gi lavere dagslysforhold (Erichsen & Horgen AS, 2007). Teknisk forskrift setter kravene til lys i § 13.12, hvor det er beskrevet at det er nødvendig å ha tilfredsstillende tilgang på lys og dagslys uten sjenerende varmebelastning. En studie gjort av Shameri et al (2013) på 12 eksisterende dobbelfasade-systemer i forskjellig klima, viste at ingen av systemene ville følge strategiene for dagslys. Det viste seg at alle modellene mislyktes i å oppfylle deres standard med en innendørs belysningsstyrke på minst 200 lx innenfor 75 % av lokalene. I følge Poirazis (2004) vil det forekomme en reduksjon i mengden dagslys som kommer inn i rommene som et resultat av den ekstra glassfasaden, og dette vil bety en forverring i naturlig dagslys i sonene. Hvis den ekstra glassfasaden består av et enkelt lags glass, vil reduksjonen i dagslysforhold være minst 10 % (Oesterle, 2001). I tillegg vil ulike design på dobbelfasaden kunne påvirke innendørs belysningsstyrke i sonene i bygget (Shameri et al., 2013). I tillegg til den ekstra glassfasaden, vil også en implementering av solavskjermingsystem kunne redusere dagslysforholdene i sonene (Sintef Energiforskning, 2007).

Belysningsnivået i lux, for et kontorarbeid bør ligge mellom 350-750 lux (Sintef Energiforskning, 2007), som vil være både fra dagslys og kunstig lys. I følge veiledningen i TEK 10 kan kravet til dagslys verifiseres enten ved beregning som bekrefter at gjennomsnittlig dagslysfaktor i rommet er minimum 2 %, eller ved at rommets dagslysflate utgjør minimum 10 % av bruksarealet. Dagslysfaktoren er forholdet mellom intern belysningsstyrke og belysningsstyrken som er eksternt for en jevnt overskyet himmel, og finnes fra Ligning 22 (Thue, 2012). Den gjennomsnittlige dagslysfaktoren skal ta utgangspunkt i et tilstrekkelig antall punkter i rommet, hvor den resulterende gjennomsnittlige dagslysfaktoren skal finnes som et utgangspunkt i disse punktene. Dagslysfaktoren er her forkortet til DaF for å ikke forveksle den med forkortelsen på dobbelfasaden som er DF .

$$DaF = \frac{\text{intern belysningsstyrke}}{\text{ekstern belysningsstyrke}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (22)$$

Selv om dagslyset representerer en betydelig lyskilde, vil det være nødvendig å basere belysningsstyrken i sonene på kunstige lyskilder også. Dersom dagslysfaktoren er under 2 % vil rommet føles mørkt og mye elektrisk belysning vil trolig være nødvendig. Dette er en situasjon som ikke vil være ønsket i bygg med varig opphold. Sammenhengen mellom solhøyde og belysningsstyrke ved overskyet himmel kan sees i Ligning 23 (Thue, 2012), hvor E_H er belysningsstyrken på et horisontalplan utendørs, mens h er solhøyden angitt i grader.

$$E_H = 500 \cdot h \text{ [lux]} \quad (23)$$

I måneden Mars i Oslo kan det oppstå en solhøyde på 30°(Erichsen & Horgen AS, 2007). Belysningsstyrken på et horisontalplan utendørs ved en overskyet himmel vil da være omtrent 15 000 lux beregnet fra Ligning 23. Denne verdien kan brukes til å finne dagslysfaktoren i rommet ved senere behov.

4.5 Doble fasader i forskjellig klima

Generelt er det ansett at doble fasader gir forbedret ytelse til bygningen i de fleste klimaer rundt om i verden (Hollingsbee et al., 2009), men i veldig varme eller kalde klima er det likevel nødvendig med en grundig analyse tidlig i prosjekteringen før man bygger med doble fasader.

I følge Hollingsbee et al. (2009) er energisparingen for bygninger relatert til klimaet og ved riktig prosjektering av doble fasader kan den:

- Forbedre den termiske isolasjonen. Den doble fasaden reduserer varmetap til ytre omgivelser og sparer på energien som kreves for å varme opp bygningen
- Forvarme inntaksluften. Dersom den doble fasaden er vendt mot solen kan den samle opp varme for å forvarme inntaksluften, og dermed redusere energi som ville vært brukt til å forvarme luften som skal inn i bygningen.
- Redusere kjølebehovet. Gjennom sommeren så kan integrert solavskjerming i hulrommet redusere solenergi som kommer inn i rommet og dermed redusere kjølebehovet i bygningen.
- Fungere som naturlig ventilasjon. Mellom sommer og vinter så kan hulrommet fungere som en klimabuffer. Det muliggjør at interne vinduer kan åpnes slik at man får naturlig ventilasjon i bygningen og dermed reduserer man etterspørselen på klimaanlegget.

4.5.1 Doble fasader i varmt klima

Tradisjonelle bygninger i varmere klima har flere problemer knyttet opp mot termisk komfort, naturlig ventilasjon og gjenskin (Shameri et al., 2011). I sommermånedene, i varmere klima, kan doble fasader føre til overopphetning i hulrommet med påfølgende økt energibruk for kjøling (Baldinelli, 2009). Den største utfordringen ved bruk av doble fasader vil altså være temperaturoppbyggingen i hulrommet ved solfylte dager. Luften i hulrommet mellom glasslagene blir varmet opp av solstrålingen som igjen varmer opp solavskjermingssystemet. Dermed kan man se på det som om at fasaden oppfører seg som en solfanger og øker temperaturen av luften i hulrommet (Goia, 2013).

For å redusere innetemperaturen og redusere behovet for kjøling, er det mulig å lagre den varmen som er til overs i tunge materialer i bygningskonstruksjoner, hvor disse termiske lagrene kan betegnes som termisk masse (Høseggen, 2008). Termisk masse utgjør bygningens materiale i tak, gulv og yttervegger. Typiske materialer som bidrar betydelig til den termiske massen i en bygning er betong, tegl, metaller og til en viss grad tre. Fallahi et al. (2010) så på energiytelsen og energiforbruket til en dobbel fasade ved bruk av termisk masse. Testanlegget stod oppført i München i Tyskland og har dermed brukt klimadataene derfra. Studien konkluderte med at doble fasader designet i et bygg med termisk masse minker risikoen for overopphetning og bidrar til videre generell energieffektivitet av systemet både på sommer og vinterstid. Som et resultat av direkte og indirekte solgevinst i absorpsjon av termisk masse, vil det gi en lavere temperatur i luftkanalene, noe som igjen resulterer i en redusert last som trengs å bli fjernet fra det tilknyttede rommet og til hulrommet i den doble fasaden. Dette unngår overoppheting og ubehag på dager knyttet til høy solinnstråling på sommeren (Fallahi et al., 2010), og kan dermed fungere i bygg i varmt klima.

4.5.2 Doble fasader i kaldt klima

Doble fasader har fått en større aksept og applikasjon i Europa, Nord-Amerika og Japan siden 1980 tallet på grunn av litt kaldere klima (Zhou and Chen, 2010). I kalde klima, er hovedformålet å redusere varmestrømmer fra bygningen, og derfor er lave U-verdier for isolasjonsmaterialer nødvendig for å motstå kulde og unngå varmetap gjennom bygningskonstruksjonen. For bygninger med doble fasader i kaldere klima er hovedideen som tidligere nevnt, å bruke skorsteinseffekten for

å kunne basere hulrommet på naturlig ventilasjon med oppdrift (Zhou and Chen, 2010). I forhold til en enkelt fasade vil dobbelfasaden fungere som en buffer og dermed redusere oppvarmingsbehovet (Haase and Wigenstad, 2010). I kaldere klima vil den termiske bufferen kunne gi fra seg varme på vinteren og kjøling på sommeren og dette vil kunne gi positive utslag på energibruken. Bygningens varmetap og solvarme er en direkte funksjon av det lokale klimaet, derfor er det ekstra viktig i kaldere klima som Norge å sørge for at bygningene er energieffektive. Bygningers energiforbruk ved bruk av doble fasader avhenger av de termiske resultatene, spesielt den termiske varmeoverføringen og solvarmen som endrer seg med årstid og breddegrad (Zhou and Chen, 2010). Siden doble fasader har vært mest brukt i tilknytning til naturlige ventilasjonssystemer er det blitt lite brukt Norden da det er utfordrende å oppnå tilstrekkelig kontrollert varmegjenvinning av ventilasjonsluften (Lindberg and Magnussen, 2010). I Norge har bruken av doble fasader vært lite utbredt. I følge Sintef Byggforsk (Haase and Wigenstad, 2010) var det i 2010 bare rundt 10-12 bygninger hvor dette var benyttet. Ofte har valget av å bruke en dobbelfasade vært av arkitektonisk begrunnelse. Eksempler i Norge der det på eksisterende bygg er bygd dobbel fasade:

- Arendal, FN-huset (2006) – «Boksfasade»
- Trondheim, Elektrobygg B (2000) – Ekstra glassfasade med integrerte PV-moduler
- Hamar rådhus (2001) – «Forhengsfasade»
- Oslo, Hydro Vækerø (2009) – «Boksfasade»

4.6 Simuleringsmetodikk for doble fasader i kontorbygg

Det finnes flere måter å simulere ytelsen til en dobbelfasade på. Det kan gjøres både numerisk, eksperimentelt og ved simulering. Den tilgjengelige litteraturen på feltet er spesielt fokusert på å studere den numeriske termiske ytelsen til doble fasader under ulike klimasoner, samt ulike måter å implementere den doble fasaden (De Gracia et al., 2013). Et av problemene med modellering av doble fasader er fraværet av eksperimentell data (Larsen et al., 2008), og at de numeriske metodene kanskje ikke blir sammenlignet med realistiske data.

Det finnes bare et få antall simuleringer og målinger som er tilgjengelig for å støtte de påståtte fordelene av doble fasader i bygg (Høseggen et al., 2008). Pasquay (2004) påpeker at doble fasader ikke vil være det beste alternativet for alle bygninger for hvert sted og at hver bygning må sees på individuelt. Han konkluderer med at energi kan spares med doble fasader i bygg på spesifikke steder sammenlignet med konvensjonelle bygninger. Enkelte mener at retningslinjer og anbefalinger for modellering og simulering av doble fasader er vanskelig å finne, og til og med eksempler er sjeldne (Høseggen et al., 2008). Noe arbeid og studier er gjort av Dickson (2004) og Hensen et al. (2007) på dette problemet hvor begge poengterer at modellering av doble fasader er spesielt kompleks på grunn av den høye graden av koblinger mellom varmeoverføringsprosesser. *Delkapittel 4.6.1 Simuleringsmetodikk*, gir en forklaring på de involverte og relevante parameterne som er nødvendig for en simulering med doble fasader i bygg.

4.6.1 Simuleringsmetodikk

Det er viktig at riktige parametere og verdier blir satt inn i simuleringsprogrammet for å kunne få så realistiske tall som mulig når energibruk og inneklima skal vurderes. Før simulering er det derfor nødvendig at de ulike parameterne er tenkt nøye igjennom og bestemt før man begynner å simulere.

Parameterne som har størst innflytelse på luftmassestrømmen og temperaturen i den doble fasaden vil være (von Grabe, 2002):

- Størrelsen på ventilen eller åpningen i øvre og nedre del av den doble fasaden
- Dybden av hulrommet samt posisjonen til solavskjermingssystemet i hulrommet

- Materialet av solavskjermingssystemet, spesielt absorpsjonskoeffisienten
- Kvaliteten på glassene i fasadene, spesielt transmisjonsfaktor, U-verdi og absorpsjonskoeffisienten

Det er viktig å forstå at utformingen på fasaden kan optimalisere funksjonen til den doble fasaden (Poirazis, 2004). Videre er det viktig å være fokusert på hovedmålene som skal nås og begrensningene på utformingen som kan påvirke sensitiviteten av det ønskede systemet. Grunnen til dette er for å kunne forutse og gi en sikrere prognose på oppførselen til den doble fasaden.

4.6.2 Utfordringer og svakheter

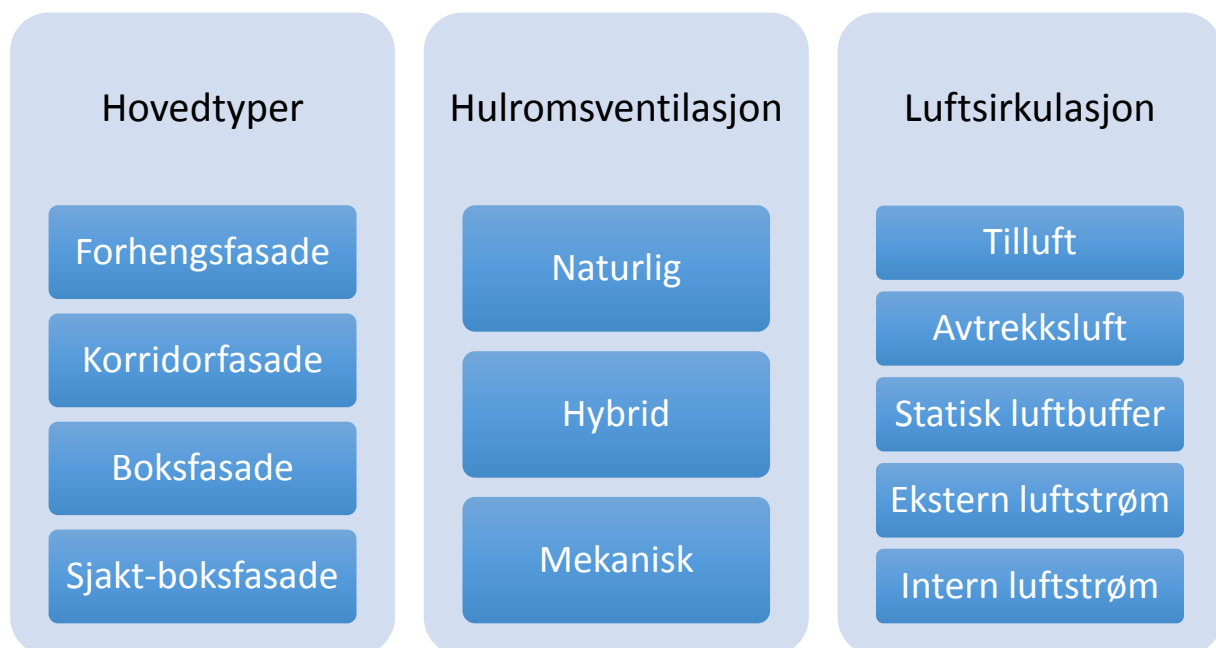
Kjernen i problemet ved modellering av doble fasader er relatert til nøyaktighet og hvor godt den simulerte modellen forholder seg til de resultatene den virkelige bygningen vil gi. Områdene som gir mest usikkerhet er (Dickson, 2004):

- Naturlig ventilasjon i hulrommet (konveksjons prosedyre, ventilasjonsåpninger)
- Persiener og/eller lameller (posisjon i hulrommet, vinkel)
- Oppdeling av hulrom (lagdeling i en fleretasjes-fasade)
- Kombinert konveksjon, solavskjerming og ventilasjonskontroll

Det finnes altså flere forskjellige typer og størrelser på doble fasader, alt fra fleretasjes bygninger til enklere vinduer med luftstrøm. Disse kan utnytte ulike typer komponenter som blant annet persiener, lameller, forskjellig dybde på hulrommet eller ulike ventilasjonsprinsipp, hvor alle faktorene vil kunne påvirke den termiske prosessen som oppstår i en dobbelfasade.

4.7 Oppsummering - doble fasader

Doble fasader består i hovedsak av to fasader med et hulrom imellom, hvor det ytre laget gir beskyttelse mot nedbør og demper inntrengningen av lyder fra omgivelsene. Hulrommet kan bli brukt som en termisk buffer ved å avgi varme om vinteren. Doble fasader skal kunne gi økt åpenhet til omgivelsene ved bruk av store glassareal og dermed forbedre inneklimate. Prinsipper for den doble fasaden er oppgitt i Figur 23.



Figur 23: Prinsipper for dobbelfasade (Andresen, 2002, Haase and Wigenstad, 2010, Oesterle, 2001)

For å kunne bygge med doble fasader er det viktig at det gjøres grunnleggende planlegging og prosjektering. Det er viktig å se på klimadata, orientering av fasaden, plassering, utforming og at det gjøres simuleringer med lokale parametere for å få så realistiske verdier som mulig både for inneklime og energibruk. I flere studier vises det til både fordeler og ulemper ved bruk av doble fasader og i Tabell 4 er noen av disse listet opp.

Tabell 4: Fordeler og ulemper ved bruk av doble fasader

Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> • Vindbeskyttende solavskjermingselement i fasaderommet • Støyreduksjon • Muligheter for nattventilasjon • Fungerer som termisk buffer • I bygninger med ventilerte system så virker solbeskyttelsen under alle vindforhold og har ingen negativ termisk effekt på rommets temperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> • Høyere temperaturer i fronten av vinduet enn bak de ytre lamellene. • Fare for overopphetning • Akustikkproblemer mellom rommene • Fuktproblemer • Større brannfare • Relativt høye investeringskostnader • Høyere vaskekostnader

5 Relevante simuleringsverktøy

De siste 50 årene har et bredt utvalg av energisimuleringsprogrammer blitt utviklet, forbedret og er nå i bruk i samfunnet (Crawley et al., 2008). Energisimuleringsverktøy forutser energiytelsen av en gitt bygning og den termiske komforten for de som oppholder seg i bygningen. Begrensninger gjelder for nesten alle simuleringsverktøy i dag, og derfor er det nødvendig å forstå visse grunnleggende prinsipper for energisimulering. Et simuleringsresultat kan bare være så nøyaktig som inndataen som er lagt inn i programmet. Siden termiske prosesser i en bygning er ganske komplisert, lager simuleringsprogrammene kvalifiserte ligninger og metoder, men disse vil fortsatt være omtrentlige og dermed ikke helt nøyaktige som for en virkelig bygning. Simuleringen i dette prosjektet er gjennomført med IDA ICE slik som det var definert i prosjektbeskrivelsen, i tillegg er programmet ParaSol blitt brukt for å finne riktig U-verdi, g-verdi og transmisjon gjennom den doble fasaden. Dette kapittelet gir en kort litteraturstudie av de valgte simuleringsprogrammene samt andre lignende energisimuleringsprogram.

5.1 IDA Indoor Climate and Energy

IDA Indoor Climate and Energy (ICE) er utviklet av svenske EQUA Simulations AB, og er definert som et program hvor hver underliggende ligning kan bli gjennomgått og hver variabel kan logges av brukeren (EQUA Simulation AB, 2013a). Dette simuleringsverktøyet er for en full dynamisk beregning av inneklimate og energiforbruk i bygninger. Programmets matematiske modeller er beskrevet i form av likninger i et formelt språk, kalt NMF (Neutral Modell Format), som gjør det enkelt å oppgradere programmodulene. De generelle likningsbaserte metodene som brukes i IDA ICE, i kombinasjon med fleksibel arkitektur, gjør det mulig å utvikle programvaren til å tilpasse de lokale kravene.

Normalt vil systemet som blir simulert bestå av en eller flere soner, et primær system og en eller flere luftbehandlingsaggregater. Værdata kan hentes fra klimafil, eller kan lages av en modell for en 24 timers periode (EQUA Simulation AB, 2013b). IDA ICE utfører detaljerte helårs- og dynamiske flersone simuleringer, som analyserer det termiske innendørsklimaet og energiforbruket i hele bygningen (EQUA Simulation AB, 2013a). Kalkulering av sonenes varmebalanse, inkludert, solstråling, mennesker, utstyr, lys, ventilasjon, varme- og kjøleutstyr, overflatetransmisjon, luftlekkasje og kuldebroer, kan bli presentert etter simulering. I tillegg kan vind og oppdrift av luft, overflatetemperaturer, komfort indekser, CO₂-nivå og effektytelser av primær og sekundær komponenter bli kalkulert. En enkel prosedyre for beregning og rapportering av kjøling, oppvarming, luftbehov og energi gjør det enkelt og effektivt å sammenligne ulike systemer og resultater. Bygningskroppen i IDA ICE kan enten bli lastet inn som en DWG- eller en IFC-fil eller den kan bli konstruert av brukeren selv. IFC-fil inneholder informasjon om materialer og U-verdier som er viktige for programmet. I IDA ICE kan man velge et standard anlegg eller et ESBO-anlegg ("Early Stage Building-Optimization plant"). ESBO anlegget gir mulighet til å eksperimentere med variasjoner i både bygninger og systemer på et tidlig stadium (EQUA Simulation AB, 2013b). Man kan velge mellom forskjellige fornybare energikilder og bygge anlegget deretter.

Det er mulig å velge mellom to forskjellige matematiske modeller i IDA ICE, «Climate-model» eller «Energy-model». Klimamodellen gir en svært detaljert fysisk modell av bygningen og dens komponenter med mulighet for å finne vertikal temperaturgradient. Energi-modellen er en noe enklere fysisk modell basert på en midlere strålingstemperatur. Utfordringer med Klima-modellen er at den kun kan brukes dersom bygget er av rektangulær geometri.

5.2 EnergyPlus

EnergyPlus er et simuleringsprogram som ingeniører, arkitekter og forskere bruker for å modellere og optimalisere energi- og vannforbruk i bygninger. Simuleringsprogrammet er fra 1996 og er utviklet av U.S. Department of Energy (Crawley et al., 2001). EnergyPlus er en energianalyse og ser på den termiske lasten når den simulerer. Basert på brukerens beskrivelse av bygningen inkludert de mekaniske systemene, interne laster etc., vil EnergyPlus beregne hvor mye oppvarming og kjøling som trengs for å opprettholde termisk komfort (EnergyPlus, 2013). Modellering av ytelsen til en bygning med EnergyPlus muliggjør optimalisering av bygningsdesign for å bruke mindre energi og vann.

EnergyPlus er basert på en integrert (last og systemsimuleringer) tilnærming (Crawley et al., 2001), som fører til mer nøyaktige anslag av temperaturer i områder og derfor et bedre estimat av ulike resulterende parametere, slik som termisk komfort. Programmet inneholder tre grunnleggende komponenter - en simuleringsleder som kontrollerer hele simuleringsprosessen, en simuleringsmodul for varme- og massebalanse og en simuleringsmodul for bygningssystemet (Crawley et al., 2001).

Dette simuleringsprogrammet inneholder mange innovative simuleringsmuligheter, og har en integrert løsningsteknikk som gir mulighet for brukeren til å evaluere prosessen. Brukeren har mulighet til å utføre både enkle og avanserte simuleringer og analyseringer av individuelle komponenter, soner, termisk komfort og dagslys, og gir muligheter for å sammenligne simuleringene med faktiske systemkonfigurasjoner. Det trengs ganske store mengder inndata før simuleringen kan utføres i EnergyPlus. Dette gjør det vanskelig å utføre en trinnvis simulering for å kunne påvise eventuelle problemer i designfasen. I tillegg må modellen være relativt komplett før de eventuelle problemene kan løses (Crawley et al., 2001).

5.3 TAS-program

Environmental Design Solutions Limited (EDSL) ble dannet i 1989 for å utvikle kommersielt TAS Software. TAS (Thermal Analysis Simulation) er et simuleringsverktøy for bygningsmodellering, som utfører raske, dynamiske og termiske simuleringer for komplekse bygninger. Verktøyet kan nøyaktig forutsi energiforbruk, CO₂-utslipp og komforten til de som skal oppholde seg i bygningen (EDSL, 2012).

TAS gir en løsning for termisk simulering av en bygning og er et omfattende verktøy for modellering av anlegg og systemer som bruker grafisk og komponentbasert analyse (U.S Department Of Energy, 2011a). Dette simuleringsverktøyet kan gi en optimalisering for bygninger innen miljø, energi og komfort. TAS Engenieering har et modulært design og er delt inn i tre hovedprogram; 3D modellen, bygningssimuleringen og resultat.

3D modellen er utviklet til å lage bygningsmodellen for simulering. Man kan enten tegne bygningen som en skisse selv i programmet eller man kan importere CAD tegninger for å generere mer detaljerte modeller. For bygningssimuleringen vil bygningskonstruksjonen automatisk bli kalkulert for å gi en potensiell luftstrøm gjennom bygningen. Altså vil den naturlige ventilasjonen automatisk bli simulert og man kan bestemme hvilke vindu, dører etc. som skal være åpne. Man kan implementere dynamisk kontroll om det er ønskelig for å kontrollere åpningene. For resultatdelen kan enhver kombinasjon av parametere fra hvilken som helst sone eller overflate vises og sammenlignes i en tabell eller på grafisk format. Byggematerialer og glasstyper kan hentes fra de omfattende databasene som TAS-programmet er koblet opp til. Materialene blir dermed lagt inn i modellen slik at de kan brukes ved simulering.

5.4 TRNSYS

TRNSYS (Transient System Simulation Tool) er et dynamisk simuleringsverktøy som ble utviklet for over 30 år siden, med fleksibilitet i modelleringsystemer av bygninger. Utviklingen av programmet startet så tidlig som på 1970-tallet av Solar Energy Laboratory ved universitet i Wisconsin-Madison, USA, og har vært i kontinuerlig utvikling frem til nå (The University of Wisconsin, 2013). TRNSYS er en fleksibel og grafisk programvare som brukes til å simulere oppførselen til forbigående systemer. Dataene som kommer ut av en komponent sendes til inndataene på en annen komponent. TRNSYS inkluderer grafisk grensesnitt, en simuleringsmotor og et bibliotek med komponenter som inneholder både standardutstyr, fornybar energi og ny teknologi. Programmet blir brukt i applikasjoner som byggsimulering, solenergi og termiske prosesser i bakken kombinert med varmeoverføring, geotermiske varmpumpeanlegg og optimalisering av kraftverk (TRNSYS, 2014).

TRNSYS består av to deler, hvor den ene delen er en motor, også kalt kjernen. Kjernen leser og behandler inndataen, løser systemet iterativt, bestemmer konvergens og plotter systemvariablene (TRNSYS, 2014). Kjernen er også det verktøyet som bestemmer de termiske egenskapene, inverterer matriser, utfører lineære regresjoner og interpolerer eksterne datafiler. Den andre delen av TRNSYS er et omfattende bibliotek av komponenter, hvor hver av disse modellerer ytelsen av en del av systemet. Standardbiblioteket omfatter rundt 150 modeller, alt fra pumper til flersonebygninger. Modellene er konstruert på en slik måte at brukerne kan endre eksisterende komponenter eller skrive sine egne for å utvide mulighetene i programmet. Flexibiliteten gjør at brukeren kan studere systemer eller systemkomponenter i detalj. Dette krever god kjennskap til både program og fysikken i systemet, og kan oppfattes som tidkrevende på grunn av et stort antall parameterverdier som må håndteres.

5.5 ParaSol

ParaSol v3.0 er et prosjekteringshjelpemiddel som har blitt utviklet av et forskningsprosjekt "solskydd i byggnader" via Lund universitet. ParaSol er et dataprogram for beregning av sol og termiske egenskaper til vinduer med solavskjerming og energibehov av et rom med vindu og solavskjerming (Hellström et al., 2007). Ved hjelp av ParaSol kan man studere hvor effektiv ulike glass og solavskjerminger hindrer solinnstråling i å ta seg inn i bygningen samt hvordan ulike valg påvirker innklimaet. Programmet er først og fremst egnet til å simulere bygninger som kontor, skoler, sykehus osv. ParaSol er et lettvent program til tross for at avanserte modeller anvendes for å beskrive solinnstråling, skygger, solavskjermingssystem, vindu samt simulering av innklimaet (Kvist, 2006).

Arbeidet i ParaSol er inndelt i fire ulike hovedfunksjoner, rom, vindu, solavskjerming samt simulering. Ved oppstart av ParaSol finnes det en rom-modell som allerede er lagt inn sammen med et antall definerte inndata. Det er dermed mulig å direkte gjøre en simulering uten å gi eller endre på inndataene. Den geometriske modellen representerer en rektangulær rom-modell med ett vindu. Modulen eller rommet forutsettes å være omgitt av andre rom med samme termiske forhold. Den veggen som vinduet sitter i er ytterveggen om er eksponert for uteklimaet.

Det kan gjøres to ulike simuleringer for den aktuelle sonen i ParaSol, disse er soltransmisjon og energibalanse. Ved simulering av soltransmisjon kan man studere effekten hos solavskjermingen i kombinasjon med vindussystemet. For energibalansen kan man studere hvilke effekter som den valgte kombinasjon av solavskjerming og vindussystem har på innklimaet i rommet. I begge tilfeller er det forutsatt at det er lagt inn data for funksjonene til rom, vindu og solavskjerming (Lunds tekniska Högskola, 2014).

5.6 SIMIEN

SIMIEN er et simuleringsverktøy fra Norge som er utviklet og solgt av Programbyggerne ANS. Programbyggerne er et selskap som ble stiftet i 1993 og har siden da utviklet og solgt simuleringsprogrammer for beregning av energibehov og inneklime i bygninger. SIMIEN utfører simuleringer av tilstanden i bygninger med beregning av energi- og effektbehov, samt analyse av inneklimate. Bygningen deles i forskjellige soner hvor det i hver sone angis interne laster, ventilasjon, varme og kjøling. Andre bruksområder for bruk av SIMIEN som et simuleringsverktøy er evaluering mot byggeforskrifter, energimerking, dimensjonering av oppvarmingsanlegg, ventilasjonsanlegg og kjøling (ProgramByggerne, 2013). SIMIEN bygger på den dynamiske beregningsmetoden beskrevet i NS 3031:2007 og alle inputdata blir hele tiden evaluert opp mot de norske byggeforskriftene. For å tilfredsstille forskriftene må bygningen overholde minstekravene eller energiltak, energiramme eller varmetapsbudsjett som er definert i TEK10. Programmet gjør det mulig å simulere et enkelt rom, en definert sone, eller et helt bygg.

Erfaringer med SIMIEN tilsier at det er et enkelt og brukervennlig verktøy som tilbyr god presentasjon og dokumentasjon av data (Dokka et al., 2011). Selv om SIMIEN oppfattes som et godt simuleringsverktøy så har programmet begrensninger på hvor detaljert man kan legge inn data på enkelte parametere. Det går for eksempel på modellering av komplekse styringssystemer, ved at energisystemet og ventilasjonssystemet ikke kan modelleres i detalj. I tillegg er det begrensninger for geometrien, soneoppdeling og naturlig ventilasjon.

5.7 CFD – Computational fluid dynamics

CFD står for «Computational Fluid Dynamics» og er en fellesbetegnelse for analyse- og beregningsverktøy for simulering av fluider (Rambøll, 2015). CFD blir brukt til å anvende matematikk, fysikk og beregningsorienterte programvarer for å visualisere hvordan en gass eller væske strømmer, samt hvordan gass eller væske påvirker gjenstander som renner forbi. CFD er en fellesbetegnelse for verktøy som bruker numerisk løsning, hvor strømningsmediet kan være gass, væske eller en flerfaseblanding. Det er grunnleggende Navier-Stokes ligninger for fluiders bevegelse som løses numerisk ved hjelp av datamaskiner (Rambøll, 2015). Disse ligningene beskriver hastighet, trykk, temperatur og tetthet av et fluid i bevegelse hvor strømmingen enten kan være laminær eller turbulent (Versteeg and Malalasekera, 2007).

Beregningene i CFD er komplekse og det kreves at brukeren har høy kompetanse. For å gjøre de rette valgene er det viktig med gode modelleringsferdigheter da selv med de enkleste problemene må det gjøres antagelser for å redusere vanskelighetsgraden til et håndterbart nivå (Versteeg and Malalasekera, 2007). CFD erstatter differensialligninger med algebraiske ligninger som kan løses ved en datamaskin. Selv komplekse beregninger og høy kompetanse gir CFD et forståelig resultat i form av 2D/3D hvor temperatur, trykk, varme- og massetransport etc. visualiseres (Rambøll, 2015).

6. Metode for simulering og analyse av doble fasader i IDA-ICE

Metoden som er brukt for å besvare problemstillingen er litteratursøk for å finne relevant teori, og med bakgrunn til denne litteraturen er det laget et forslag til hvordan analysere doble fasader. Her er de parametere som er antatt å være de mest kritiske, med hensyn til energibruk og inneklima, valgt ut. Deretter fokuseres det på å gjøre simuleringer i IDA-ICE for å knytte teorien opp mot praksis.

6.1 Simuleringsverktøy

Simuleringene og beregningene er utført med det dynamiske simuleringsverktøyet IDA ICE versjon 4.6.1 (IDA Indoor Climate and Energy), et program utviklet av Equa Simulation AB. IDA ICE evaluerer bygninger med hensyn på inneklima og energibruk og basert på lokale værfiler utfører programmet dynamiske simuleringer for hele året. Simuleringene vil dermed kunne gi et reelt overblikk over energibehovet og hvordan inneklimate oppfattes på bakgrunn av byggets tekniske spesifikasjoner.

6.2 Fremgangsmåte for evaluering av doble fasader

Modellen for kontorbygget er utviklet i IDA ICE. Innstillinger og inndataverdier som ble brukt for modellen vil bli gjennomgått i det neste kapitlet. Bygningen vil først bygges opp med bestemte verdier for å kunne ha et fast utgangspunkt som alle beregningene baseres på og resultatene sammenlignes opp mot. Kontorbygget skal følge kriterier for passivhus i yrkesbygninger, *NS 3701*, og *NS 3031*, men vil til å begynne med ha litt dårligere U-verdi på den doble fasaden enn det kravene tilsier at det skal være.

Når det skal sees nærmere på termisk komfort i sonene er det valgt å se på PMV og PPD verdiene i IDA ICE. Disse er beregnet for et punkt der man har plassert personbelastningen. I de aktuelle simuleringsmodellene er dette punktet plassert ved vinduet eller den doble fasaden mot midten av sonen. Det er antatt at personen i dette punktet er sittende med sentrum 0,6 meter over gulvet. I hvilken grad resultatene fra dette punktet er representativ for sonen i sin helhet er vanskelig å si noe om, men siden personen er plassert mot vinduene vil man kunne få et inntrykk av hvordan den doble fasaden endrer den termiske komforten.

Dagslyset er en viktig faktor for at inneklimate i sonene skal være tilfredsstillende. For å se hvordan dagslyset varierer med ulike implementeringer og endringer i dobbelfasaden, vil dagslysfaktoren i sonen finnes. Den gjennomsnittlige dagslysfaktoren skal i prinsippet ta utgangspunkt i et tilstrekkelig antall punkter i rommet, hvor den resulterende gjennomsnittlige dagslysfaktoren skal finnes som et utgangspunkt i disse punktene. Dette er en tidkrevende prosess, og dermed er det valgt å bare se på ett punkt i rommet. Det vil altså bli tatt utgangspunkt i dagslyset ved første kontorpult som er plassert ved vinduet. Selv om den beregnede verdien i prinsippet ikke vil gi den riktige dagslysfaktoren, vil den likevel kunne gi et bilde på hvordan dagslysnivået i samme punkt endres ved ulike forandringer i dobbelfasaden. Dagslysfaktoren angir kun forholdet mellom den innvendige og utvendige belsningsstyrken til enhver tid.

6.3 Scenarier for analyse av den doble fasaden

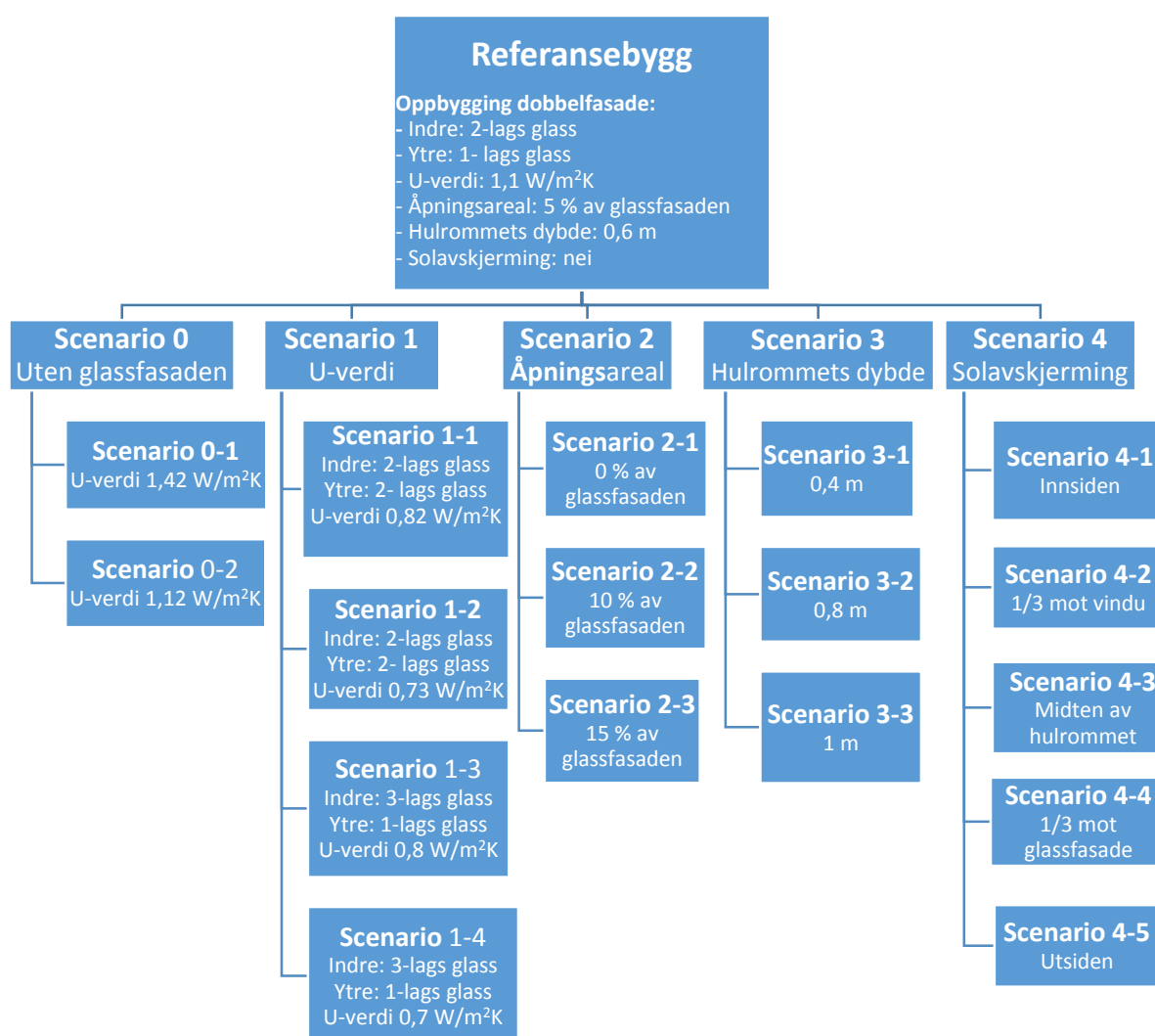
Det er viktig å etablere en representativ simuleringsmodell som kan benyttes for å analysere energibruk og termisk inneklima i et kontorbygg med doble fasader. Det ble derfor valgt ut de parametere som ble antatt at ville være de mest kritiske, med hensyn til energibruk og inneklima, for å se hvordan behovet i bygget ble endret. I *kapittel 4 Doble fasader*, ble det nevnt at noen av de mest kritiske parameterne i en dobbelfasade er:

- Kvaliteten på glassene i fasadene (transmisjonsfaktor, U-verdi og absorpsjonskoeffisienten)
- Størrelsen på åpningen i øvre og nedre del av den doble fasaden

- Dybden på hulrommet
- Plassering og materialet av solavskjermingsystemet

Gjentatte simuleringer hvor disse parameterne blir endret, kan være med på å gi informasjon om energibruket i kontorbygget og det termiske inneklimaet i sonene vil forandres. Ved å gjøre disse simuleringene med innsetting av ulike verdier for parameterne og begrensninger på utformingen kan være med å gi en bedre forståelse av hvordan systemet påvirker ytelsen. En mer detaljert, steg for steg, forklaring av den foreslåtte simuleringemetodikken vises i *VEDLEGG B.1 Foreslått simuleringemetodikk*.

Det vil dermed bli foretatt en grundig analyse av disse utfordringene for å finne en hensiktsmessig simuleringmodell som kan gi gode resultater til tross for omfanget, kompleksiteten og tiden for simuleringene. Figur 24 viser de utvalgte scenarioene som det er valgt å se nærmere på for modellen i IDA ICE.



Figur 24: Scenarioer for referansebygget

I Scenario 0 skal det sees på om bruk av dobbelfasade forbedrer energibruk og inneklima sammenlignet med en vanlig fasade. Det er valgt å se hvordan den doble fasaden vil oppføre seg mot en enkelfasade som har samme U-verdi og mot en som har dårligere U-verdi. Her er det nødvendig å gjøre simuleringer med fokus på det termiske inneklimaet, for å se hvordan det vil forandre seg i en modell med og uten dobbelfasade, men med lik U-verdi.

Det er valgt å se på oppbyggingen av den doble fasaden i Scenario 1, både med hensyn på antall glass samt U-verdi, g-verdi og transmittans. Det er interessant å se om den operative temperaturen i bygget vil forandre seg med ulik U-verdi. Det er også ønsket å se på hvordan dagslyset varierer med ulik oppbygging samt hvordan energibruk og inneklimate endres. Det er også interessant å se om temperaturen i hulrommet vil variere ved endring av antall glass i ytterste og innerste fasade.

Scenario 2 og Scenario 3 slås sammen slik at det blir sett på ulik åpning mellom hulrommet og omgivelsene med ulik dybde på hulrommet. Først og fremst vil det bli sett på om energibruket og inneklimate reagerer på dette og hvordan IDA ICE responderer til at det bare endres i disse forholdene. Deretter vil det bli sett på hvordan volumstrømmen i hulrommet endres ved ulik dybde og åpning, for å se om varmen i hulrommet vil kunne fjernes med naturlig ventilasjon.

Det siste scenarioet vil se på implementering av solavskjermingssystem. Her er det ekstra viktig å se hvordan kjølebehovet reduseres fra å ikke ha solavskjermingssystem i referansebygget til det er implementert. I tillegg er det interessant å se på inneklimate, dagslyset og hvordan den operative temperaturen i kontorbygget endres med og uten solavskjerming.

For å få en enda bedre oversikt over hvilke muligheter det er ved implementering av doble fasader er det valgt å utføre en parameteranalyse som tar for seg andre tiltak som kan gjøres med den doble fasaden. Her vil det utforskes hvordan en implementering av de «beste» scenarioene for referansebygget vil kunne forbedre inneklimate og energibruk i kontorbygget. Det vil i tillegg utføres en følsomhetsanalyse og en klimadataanalyse på modellen med den «beste løsningen» av dobbelfasaden som ble funnet i de tidligere scenarioene.

Klimadataanalysen utføres for å se hvordan ulike klimafilere for samme plass vil kunne gi forskjellig resultat. Her vil det også gjøres en analyse som tar for seg endringer i temperatur, vindhastighet og direkte og diffus solstråling på $\pm 20\%$ i klimafilere. Dette er for å få en overordnet oversikt over viktigheten til klimafilere, samt se om endringene vil påvirke en større del for de simulerte resultatene med fokus på energibruk og inneklimate.

6.3.1 Mulige utfordringer og svakheter ved simulering i IDA-ICE

Dataverktøyet som vil bli benyttet for evaluering av inneklimate og energibruk er i denne oppgaven IDA ICE. I dag er det vanligst å benyttes SIMIEN som dataverktøyet for energi- og inneklimate simuleringer. SIMIEN er som tidligere nevnt norskutviklet og er dermed skreddersydd for den standardiserte beregningsmetodikken som benyttes i Norge. En energiberegning etter norsk standard i IDA ICE er i dag mer tidkrevende og krever flere inputdata enn det beregningsprogrammet SIMIEN gjør (Erichsen & Horgen AS, 2013). For å kunne benytte IDA ICE må det foretas en del forenklinger og antagelser som kan forårsake usikkerheter samt feilberegnete resultater.

Det er vanskelig å finne tilgjengelig litteratur på studier med doble fasader som er gjennomført i simuleringprogrammet IDA ICE. Det er gjort studier med både TRNSYS, CFD og ENERGYPLUS, men IDA ICE er det lite informasjon om hvordan oppfører seg i virkeligheten i forhold til de simulerte resultatene. Det vil derfor kunne bli vanskelig å knytte prosjektets resultat opp mot andre simulerte resultater. En modell skal ikke være mer kompleks enn det som trenges for å beskrive problemstillingen tilfredsstillende. Modellen må altså være kompleks nok til å fange opp det som skal beregnes, men ikke mer kompleks enn det. Derfor er det viktig å huske at de valgte «beste» scenarioene vil bli valgt med hensyn på endring i energibruk og inneklimate for referansebygget. I tillegg vil det bli gjort en del forenklinger i selve bygget for å redusere tidsbruken på simuleringene, da det er den doble fasaden som er i fokus.

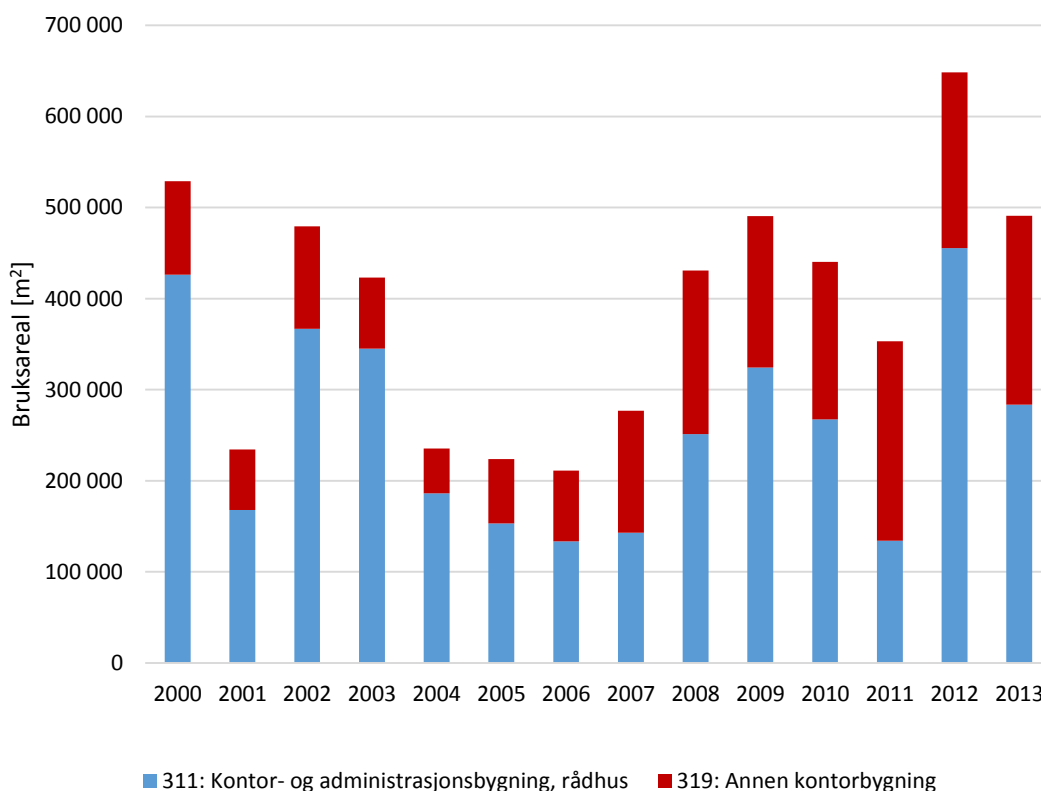
Temperaturen og luftstrømmen i hulrommet er viktige parametere for å kunne forutsi hvordan temperaturen inne i bygget vil være. Tidligere har det vært vanlig å benytte seg av programvaren CFD for å undersøke hvordan temperaturer og luftstrømningen i hulrommet oppfører seg. Dermed kan en utfordring ved å bruke IDA ICE muligens være at det vil være vanskelig å forstå hvordan luftstrømmen i hulrommet beveger seg, og hvordan temperaturen i hulrommet endrer seg med høyden på dobbelfasaden. I tillegg er IDA ICE et simuleringsprogram som krever mange verdier og parametere for å få så nøyaktig resultat som mulig. Dersom bygget er stort eller delt opp i mange soner med dobbelfasade på flere fasader, er det mange parametere som må endres på når man vil se hvordan byggets energibruk og inneklime endrer seg med de ulike innsettingene. Det kan være både tidkrevende og lett å glemme å sette inn riktige verdier når det er mange parametere som må endres.

7 Beskrivelse av referansebygget

Doble fasader er lite utbredt i Norge i dag, men ønsket om energieffektive bygninger og et godt innemiljø gjør at nye bygningskonstruksjoner stadig er i utvikling. For å få et bedre innblikk i hva som kreves for å prosjektere og optimalisere et vellykket bygg med doble fasader skal det i dette kapittelet bli sett nærmere på et generelt kontorbygg. Simuleringsmodellen i denne oppgaven skal benyttes for å analysere energibehovet og termisk inneklima i et kontorbygg som er bygd opp med doble fasader. Referansebygget spesifiseres på grunnlag av statistiske data og vurderinger fra allerede bygde kontorbygg. De valgte dataene og andre beslutninger som er tatt i forhold til referansebygget gjennomgås og begrunnes i dette avsnittet.

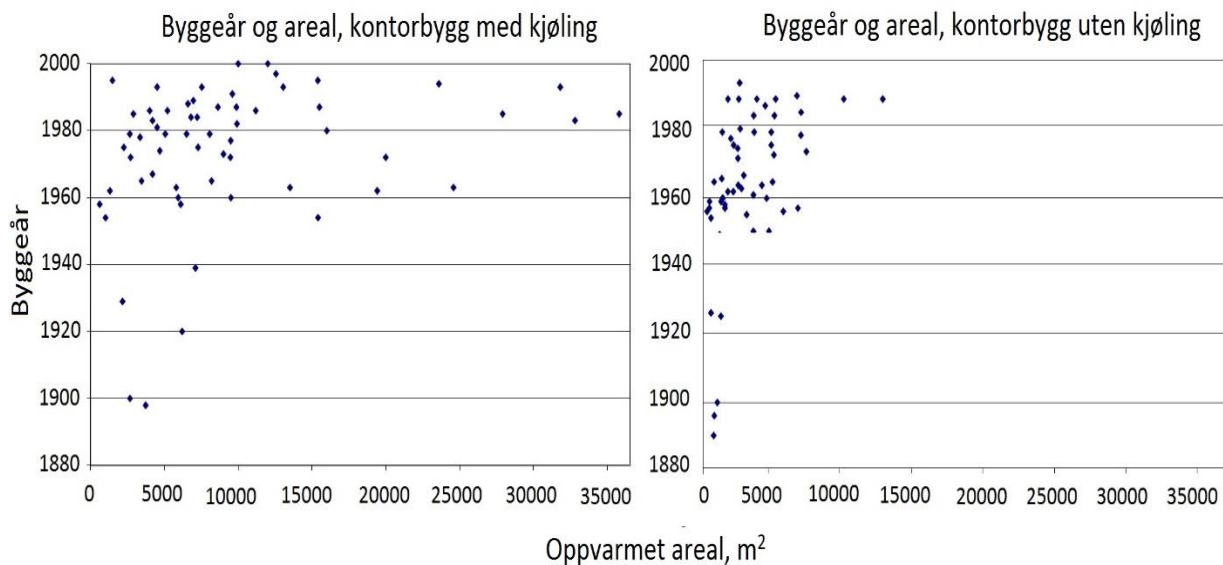
Areal og geometri

I dag finnes de fleste kontorbygg innenfor offentlig og privat tjenesteyting, men også innenfor andre næringer som industri, transportvirksomhet og bygg og anlegg (THEMA Consulting Group, 2013). Statistisk sentralbyrå utgir offisiell statistikk om det norske samfunnet, og vil bli benyttet som kilde når det skal sees nærmere på statistiske data for kontorbygget. Figur 25 viser utviklingen av bruksarealet i ferdige bygg for kategoriene «Kontor- og administrasjonsbygning, rådhus» og «annen kontorbygning». Som figuren viser har utbyggingen av kontorbygg variert de siste årene.



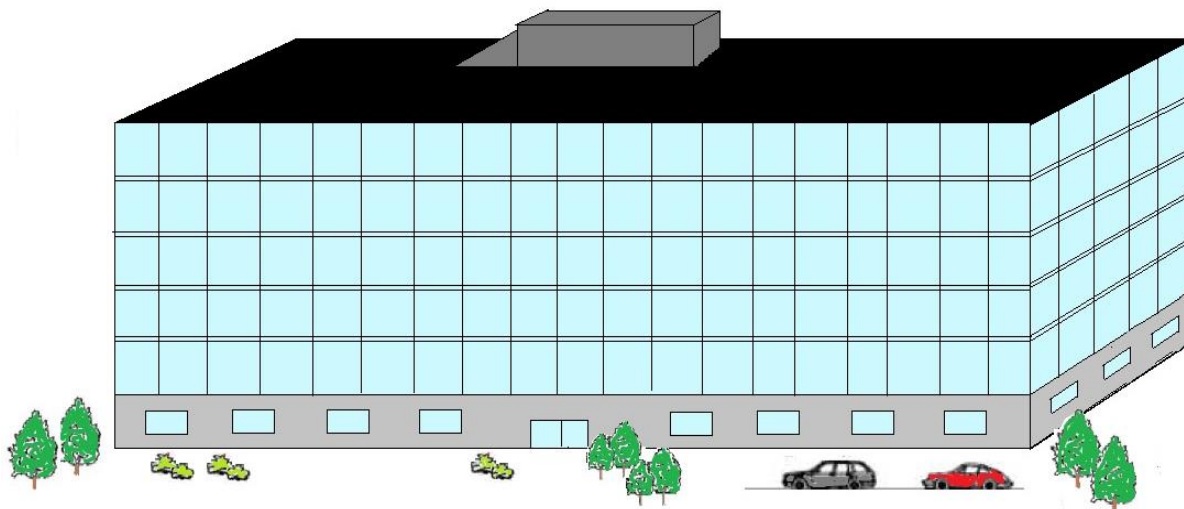
Figur 25: Areal i fullførte kontorbygg 2000-2013 (SSB, 2014)

Det er i midlertidig stor variasjon i størrelsen på kontorbyggene som bygges og også forskjeller i tilgjengelige datakilder med hensyn på gjennomsnittsstørrelse (THEMA Consulting Group, 2013). Derfor er det vanskelig å gi et eksakt gjennomsnittstall på størrelsen på kontorbyggene som varierer med alt fra 200 m² – 35 000 m² som vist i Figur 26.



Figur 26: Sammenhengen mellom byggeår og bygningers areal for bygninger med og uten kjøleanlegg (Thyholt et al., 2001)

Ved å se på Figur 26 samt andre statistiske data, er det bestemt at referansebygget skal ha et areal på omtrent 8000 m². Det er valgt å ta utgangspunkt i et rektangulært bygg med 6 etasjer, hvor hver etasje er på 1300 m². Langsides lengde er 65 m mens kortsiden er 20 m. Grunnlaget for valget av et rektangulært bygg er fordi kompakthet i bygget reduserer energibehovet, ved at transmisjonstapet gjennom ytterflatene kan reduseres (Sintef Energiforskning, 2007).



Figur 27: Kontorbyggets oppbygging

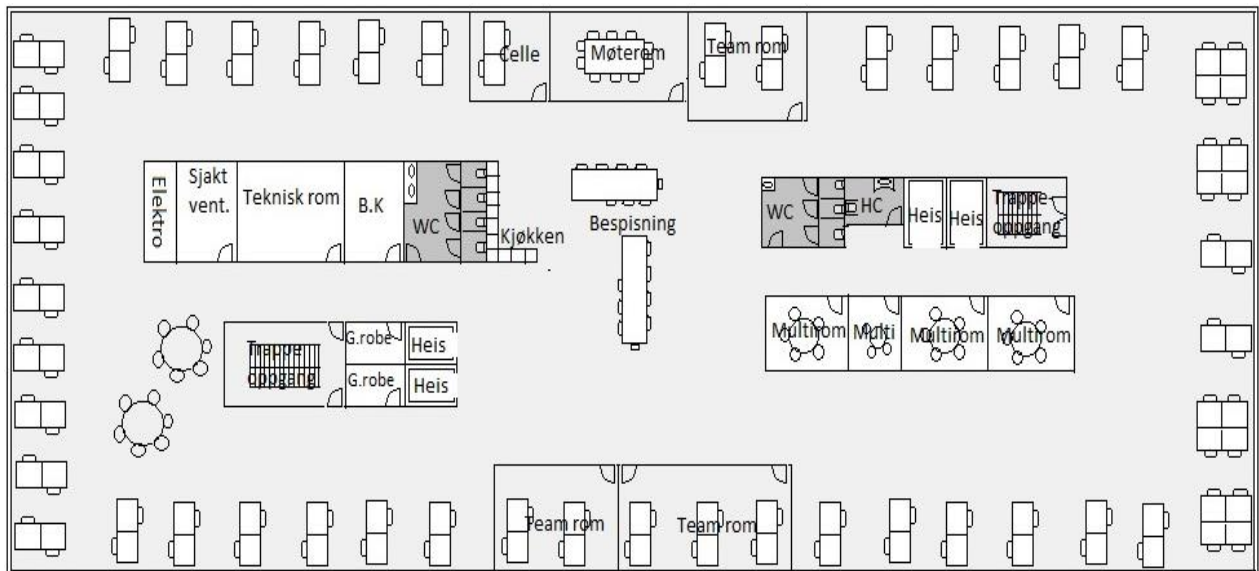
Figur 27 viser kontorets oppbygging. Bygningskroppen er kompakt, og for å sikre gode lysforhold dypt inn i bygningskroppen har en stor andel av vinduene god høyde. Lokalenes utforming i et kontorbygg bør være slik at løsningen vil bidra til å skape et godt arbeidsmiljø med en hyggelig atmosfære for de ansatte. Ligning 24 (Norsk Standard, 2007b) viser minstekravet i forholdet mellom U-verdi, bruksareal og vindusareal.

$$\frac{(U_{vindu} \cdot A_{realvindu})}{Bruksareal} < 0,24 \quad (24)$$

Det vil si at hvis vindusarealet er 20 % av BRA, må U-verdien være bedre enn 1,2 W/m²K og hvis den er 30 % tilsvarer det en U-verdi på 0,8 W/m²K. Det er også krav til totalt varmetapstall i

passivhusstandarden, og denne kan det bli vanskelig å nå med for mye glass. Det er valgt å sette inn vindu som har høyde 2,3 m, dermed vil vindusarealet rundt etasjen bli omtrent 391 m², og vil altså være 30 % av bruksarealet. For å tilfredsstille kravene i Norsk Standard må derfor vinduene ha en U-verdi som er mindre eller lik 0,8 W/m²K.

Åpne kontorlandskap har i voksende grad blitt benyttet i næringslivet de siste tiårene. Åpne landskap utnytter arealene bedre slik at flere kan jobbe på færre kvadratmeter. Det er derfor valgt at dette generelle kontorbygget skal ha et åpent landskap. Planløsningen i de forskjellige etasjene vises i Figur 28.



Figur 28: Planløsningen til kontorbygget

Varmesystem

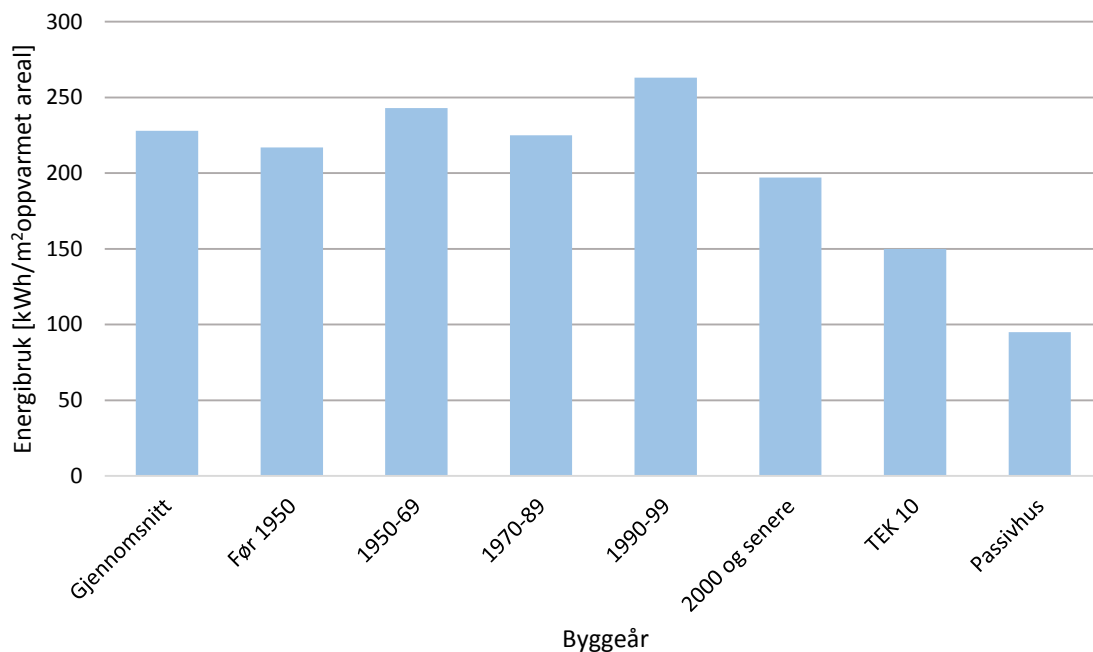
Etter plan og bygningsloven § 27-5 skal nye bygninger som ligger i områder med fjernvarme, utstyres med varmedistribusjonssystem slik at fjernvarme kan benyttes for romoppvarming, ventilasjonsvarme og varmtvann. Andelen eksisterende yrkesbygg med vannbårent varmedistribusjonssystem ble i 2012 estimert til omtrent 30 %, hvor kontorbygg har en andel på 58 % (Stene and Smedegård, 2013). Det er antatt at det vil ligge fjernvarmenett i området som kontorbygget skal bygges på og dermed skal det også brukes vannbårent varmesystem i bygget. Varmesystemet i kontorbygg i dag er altså ofte basert varmesystem bestående av enten radiatorer, gulvvarme eller begge deler. Da dette bygget vil bestå av store vindusflater i ytterveggene, er det derfor valgt å kun se på gulvvarme som varmedistribusjonssystemet. En utfordring med dette vil være at det ved de store vindusflatene kan oppstå kaldras på vinteren for de som sitter tett på ytterveggene. Øvrig energibruk i bygget er elektrisk.

Geografisk plassering

Beregningene og simuleringene i denne oppgaven vil være basert på at kontorbygget er antatt plassert i Oslo sentrum. For å få så realistiske verdier som mulig er det derfor viktig at lokale klimafilere blir benyttet. Her er det valgt å bruke DRY-klimafil som utgangspunkt.

Tekniske spesifikasjoner

Gjennomsnittlig energiforbruk for kontorbygg etter byggeår, samt energirammer for TEK 10 og passivhusstandard er lagt frem i Figur 29.



Figur 29: Energibruk for kontorbygg etter byggeår samt TEK 10 og passivhusstandarden (SSB, 2011)

Det er sett at gjennomsnittlig energibruk i kontorbygg ligger på rundt 228 kWh/m² fra 1950 til 2000 og senere. Fra kolonnen med året 2000 og senere er dette tallet redusert til 197 kWh/m², hvor en av grunnene er nye tekniske forskrifter som setter krav til både komponenter og bygningen i forhold til de tidligere årene. I dag er det det satt enda høyere krav ved nybygg i TEK 10 som er på 150 kWh/m², og denne vil oppgraderes til TEK 15 som er på vei. I stortingsmeldingene for klima- og bygningspolitikk er det varslet innføring av passivhusnivå i byggeforskriftene for 2015 (Rambøll, 2013). Siden simuleringen skal gjelde for et kontorbygg som er under oppføring vil derfor løsningen være basert på nyere standarder med litt strengere krav enn de tidligere årene. Det er tatt utgangspunkt i at konstruksjonen i bygget skal følge kravene satt i passivhusstandarden NS 3701. Tekniske referanseverdier for et «passivhus» vil det bli sett nærmere på i *delkapittel 8.1 Innstillinger og forenklinger for simuleringsmodellen*. Det tilstrebes dermed å oppnå et energiforbruk som er på nivå med det gjennomsnittlige energiforbruket for et kontorbygg av denne kategorien. I passivhusstandarden ligger totalt energibehov i et kontorbygg på omtrent 95 kWh/m² (BoligEnøk). Et energiforbruk på omtrent 95 kWh/m², basert på statistikken og kriterier for kontorbygg vil dermed bli benyttet som utgangspunkt for å definere et realistisk energiforbruk i referansebygget.

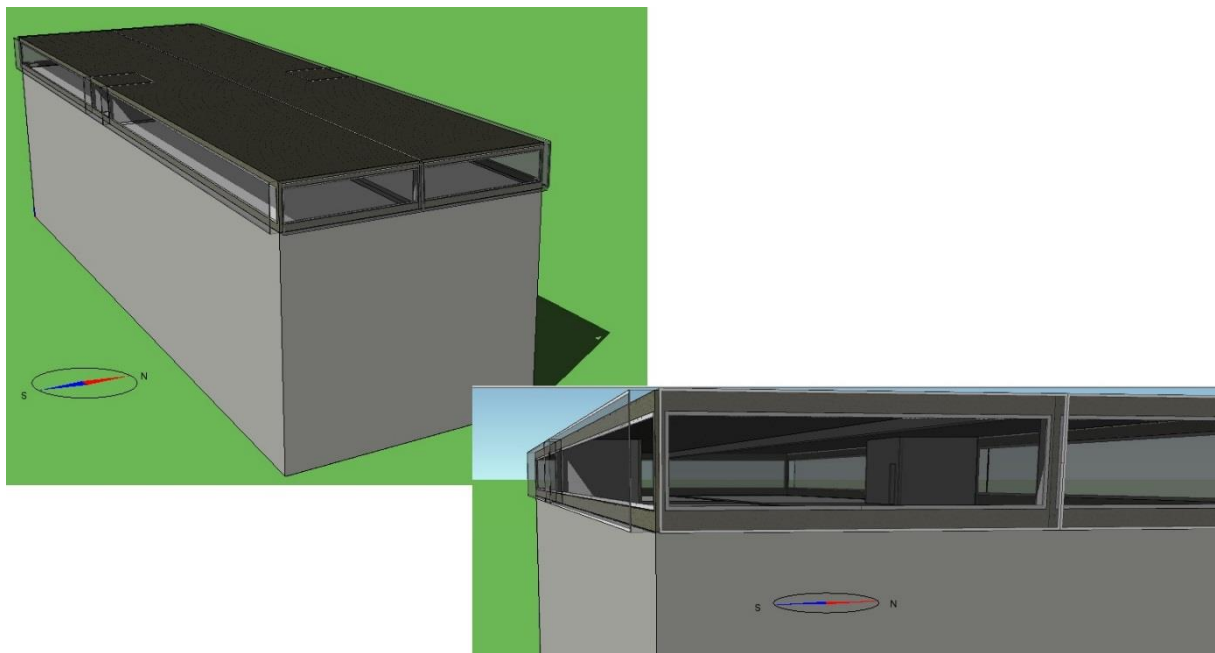
Oppsummering

Referansemodellen skal være bygd i 2015 etter bygningskategorien «kontorbygg». Bygningen skal være plassert i Oslo med et varmesystem som er basert på fjernvarme. For å redusere transmisjonstapet fra ytterveggene er det valgt å ha et rektangulært bygg. Det er valgt at den generelle modellen skal følge passivhusstandarden, da nye kontorbygg som skal bygges må følge strengere krav og forutsetninger når TEK 15, som har energikrav på passivhusnivå, blir innført. Energiforbruket for kontorbygget skal dermed være på omtrent 95 kWh/m².

8 Data for referansebygget

Dette kapitlet presenterer de viktigste dataene for bygget og belyser de mest sentrale forutsetningene som er tatt for å kunne fullføre en simulering på bygget. Gjeldende bygningskategori er, som tidligere nevnt, kontorbygning. Det er tatt utgangspunkt i flere kontorbygg for å kunne lage en generell modell i IDA ICE. Det er valgt at den generelle modellen skal følge passivhusstandarden, da nye kontorbygg som skal bygges må følge strengere krav og forutsetninger når TEK 15, som har energikrav på passivhusnivå, blir innført.

Figur 30 viser en 3D modell av oppbyggingen i IDA ICE, med den doble fasaden som ligger rundt hele etasjen. Bygget vil ligge i ganske åpent terreng, hvor det både er eksponert for solinnstråling og vind.



Figur 30: Oppbyggingen av kontorbygget i IDA ICE

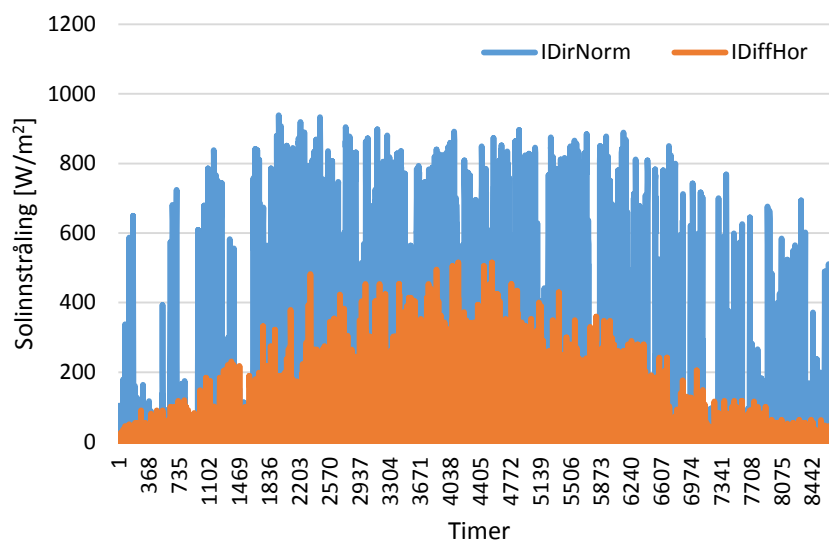
8.1 Innstillinger og forenklinger for simuleringmodellen

For at simuleringstiden skulle reduseres ble det gjort en del forenklinger i modellen. Forenklingene og innstillingene vil nærmere evalueres i dette delkapitlet.

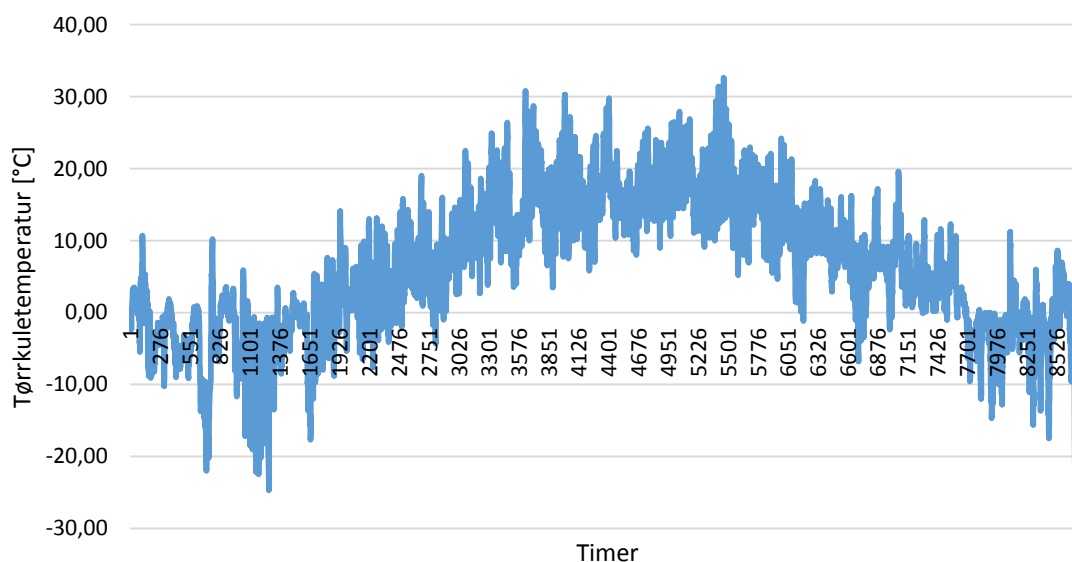
Beliggenhet og klimadata

Beliggenheten til bygningen i IDA ICE er valgt til «Oslo» for kontorbygget, da plasseringen antas å ligge i Oslo sentrum. IDA ICE opererer med klimafilere fra IWECC, men det er valgt å ta utgangspunkt i DRY-klima for referansebygget da disse filene skal inneholde gode data for steder i Norge. En analyse på innvirkningen på klimafilere vil bli diskutert i *delkapittel 9.5 Klimadataanalyse*.

Direkte normal og diffus horisontal solinnstråling for DRY-klima i Oslo kan sees i Figur 31, hvor den oransje fargen representerer den diffuse solstrålingen og den blå fargen representerer direkte normal stråling.



Figur 31: Direkte og diffus solinnstråling med DRY-klima for Oslo



Figur 32: Tørr-kuletemperatur med DRY-klima for Oslo

Figur 32 viser at den kaldeste temperaturen vil oppstå i januar med en temperatur på $-24,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ mens den varmeste temperaturen forekommer i august med en temperatur på $32,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Disse dataene vil bli brukt videre ved dimensjonering av varmeanlegget.

Bygningskropp og energibruk

Modellen er ikke importert som en DWG- eller IFC-fil, men tegnet i IDA ICE. Det er gjort en del forenklinger i simuleringstøytet for at simuleringstiden skal reduseres og for å minske tiden det tar å lage modellen. I tillegg er det oppgitt i manualen til IDA ICE at det for store prosjekter bør velges ut enkelte rom i forskjellige deler av bygget (EQUA Simulation AB, 2013b). Det er derfor valgt å ikke se på hele kontorbygget men å heller fokusere på en etasje siden den vil være lik de resterende etasjene i bygget. Hensikten med soneinndelingen i denne etasjen er for å både se på hvordan den doble fasaden påvirker rom med mindre areal samt den åpne løsningen i bygget. Tabell 5 viser gulv-, vegg- og vindusareal til den simulerte delen av bygget.

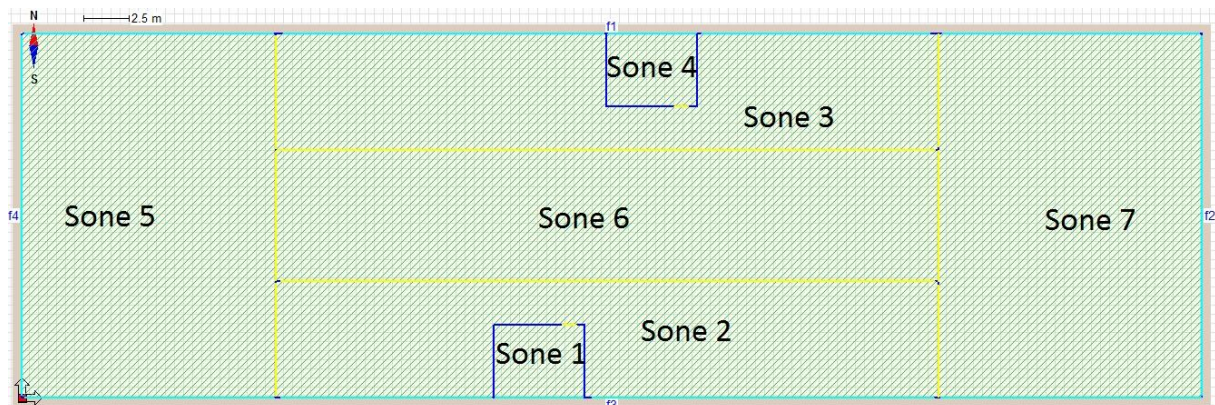
Tabell 5: Simulerte areal, referansebygg

Kontorbygget	
Gulvareal	1300 m ²
Veggareal	172 m ²
Vindusareal	383 m ²
Volum	4251 m ²

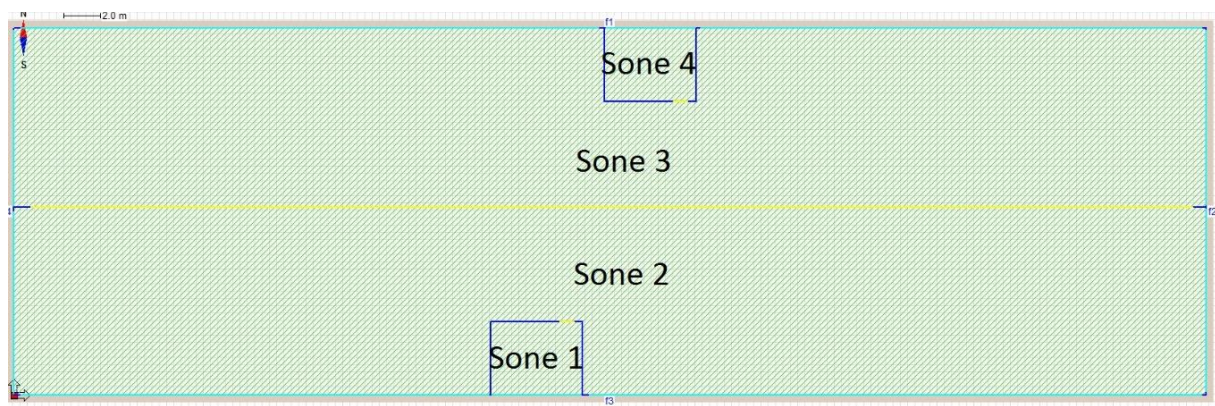
Soneinndeling

Siden det bare er valgt å ta hensyn til en etasje i modellen er det valgt å se på den øverste etasjen. Grunnen til dette valget er at denne etasjen ligger i den øverste etasjen i kontorbygget og vil dermed være den etasjen som vil være mest utsatt for solinnstråling. Dette gir muligheter for å se om enkelte soner vil få overopphetning ved mye solstråling eller høye temperaturer ved varme sommerdager. I tillegg vil denne etasjen kunne få større varmetap til omgivelsene gjennom taket, og dette gjør at «verste tilfellet» vil bli undersøkt.

For å kunne evaluere inneklimate og energibruk i bygget, må modellen deles opp i soner. For å finne ut om soneinndelingen vil påvirke temperatur og energibruk i bygningen er det valgt å se på to ulike oppdelinger som vist i Figur 33 og Figur 34. De gule linjene indikerer at det er åpent mellom sonene for å kunne simulere med den «åpne løsningen» i kontorbygget som ønsket.



Figur 33: Soneinndeling i IDA ICE, sju soner



Figur 34: Soneinndeling i IDA ICE, fire soner

Figur 33 viser modellen med sju soner, mens Figur 34 viser modellen med de fire sonene. I begge de foreslåtte oppdelingene er Sone 1 og Sone 4 «teamrom» som vil være lukket fra den åpne løsningen. Grunnen til at disse sonene vil være interessante å se på, er fordi arealene her er mindre og virkningen fra solinnstrålingen vil muligens vises bedre her. Det er valgt å gjøre en energisimulering med begge modellene, for å se hvordan de blir påvirket av de ulike soneinndelingene. Disse vises i *delkapittel 9.1 Energibruk og inneklima for referansebygget*. Energirammekravet for kontorbygget som er bygget etter passivhusstandarden vises i Tabell 6.

Tabell 6: Energiramme for referansebygget

	Bygningskategori	Energiramme [kWh/m ²]
Referansebygget	Kontorbygg	95

Den årlige gjennomsnittlige temperaturen i Oslo er 6,3 °C, som er gjennomsnittstemperaturen fra DRY-klimafilten, og kontorbyggets areal er på 7800 m². Den nødvendige oppvarmingsbehovet til romoppvarming og ventilasjon for kontorbygget kan beregnes fra Ligning 1 som ble funnet i *delkapittel 2.1.2 Passivhus*, og ble beregnet til å være 20 kWh/m².

Bygningskropp og tekniske installasjoner

Det er tatt utgangspunkt i at konstruksjonen i bygget skal følge kravene satt i passivhusstandarden NS 3701. U-verdiene, den normaliserte kuldebroen og infiltrasjonen samt settingen for SFP-faktor og virkningsgrad på gjenvinner for kontorbygget vises i Tabell 7.

Tabell 7: U-verdi, normalisert kuldebroverdi og infiltrasjon med passivhusstandarden NS 3701.

U-verdi yttervegg	U = 0,10 – 0,12 W/m ² K
U-verdi tak	U = 0,08 – 0,09 W/m ² K
U-verdi gulv	U = 0,08 W/m ² K
U-verdi vindu	U = 0,8 W/m ² K
Normalisert kuldebroverdi	Ψ = 0,03 W/m ² K
Infiltrasjon ved 50 Pa, n ₅₀	= 0,6 h ⁻¹
SFP-faktor ventilasjon	1,5 kW/m ³ /s
Virkningsgrad gjenvinner	80 %

Som tabellen indikerer har passivhus en bygningskropp bestående av svært godt isolerte yttervegger, tak og gulv. Passivhus er altså karakterisert ved at bygningen har veldig et lavt oppvarmingsbehov, hvor hovedstrategien for å oppnå slike lave verdier er reduksjon av varmetapet fra bygget. For innvendige vegger, tak og gulv ble det brukt standardverdier i IDA ICE. Materialene som er brukt er generelt lavvekts betong med isolasjon. Det er antatt at det skal være mellomtunge eller tunge konstruksjoner, noe som er tenkt at skal bidra til å redusere kjølebehovet.

Infiltrasjonene i IDA ICE kan enten bli satt til faste verdier eller som et resultat av vinddrevet luftstrømning. De faste verdiene blir som oftest brukt i veldig tidlig fase og vil ikke være nøyaktig nok. Derfor er det valgt å bruke vinddrevet luftstrømning som infiltrasjon på bygget. Trykk-koeffisientene på bygget er ikke kjent og blir dermed satt til standardverdi i IDA ICE som «semi-eksponert». Grunnen til at «semi-eksponert» ble valgt er fordi bygget er antatt omringet av andre bygg, men samtidig vil det være noe eksponert for vind og andre klimapåvirkninger.

Styring

Settpunkt-verdiene for modellen er satt til:

- Trykkdifferanse på bygningskonstruksjonen: -20 til -10 Pa
- Dagslys på arbeidsplassen: 100 til 10 000 lux
- Relativ fuktighet: 20 – 80 %
- CO₂ konsentrasjon (nedre grense betyr at luftstrømningshastigheten begynner å øke til maksimal verdi): 700 – 1000 ppm
- Temperatur: 21°C - 25°C

Når temperaturen i sonen er under 21 °C vil varmen slå seg på, og dersom temperaturen stiger over 25 °C vil kjølesystemet aktiveres. I følge NS 3031 skal settpunkts temperaturen for oppvarming av bygningen være 21 °C i driftstiden og 19 °C utenfor driftstiden. Settpunktet for dagslys på arbeidsplassen vil si at dersom lysintensiteten på arbeidsplassen er under 100 lux, så vil kunstig lys slås på, og dersom lysintensiteten er over 10 000 lux, er kunstig lys i sonene slått helt av.

Internlast, driftstid og varmetap

Tidsplanene for kontorbygget vises i VEDLEGG C. Tidsplaner, hvor det er antatt at tilstedeværelsen vil kunne variere i løpet av dagen, og at bygget vil være stengt i helgene og på helligdager. I Tabell 8 vises standardverdiene av varmetilskudd som kommer fra belysning, utstyr og personer.

Tabell 8: Varmetilskudd - standardverdier i driftstiden NS 3701

Kontorbygg	
Belysning	4 W/m ²
Utstyr	6 W/m ²
Personer	4 W/m ²

Ut fra disse standardverdiene ble verdiene for utstyr og lys i hver sone satt. Utnyttelsesfaktoren for utstyret ble satt til 1, det vil si at all varme og stråling fra utstyret avsettes i sonene og det er ingen varme som går tapt.

Det kommer også varme til oppholdssonene fra personene som oppholder seg der. IDA ICE beregner varmetilskuddet fra personer etter hvor mange som oppholder seg i den eksakte sonen, og derfor er det nødvendig å finne et omtrentlig antall personer som vil oppholde seg i bygningen. Ved å bruke varmetilskuddet definert for passivhusstandarden for avgitt effekt per BRA, vist i Tabell 8, og avgitt effekt per person kan antall personer i bygningen beregnes. Personer med ulik aktivitet vil avgi varierende varmemengde alt etter hvor hardt det arbeidet eller aktiviteten er. En person under lett arbeid med en omgivelsestemperatur på 21 °C vil kunne avgi omtrent 84 W (The Engineering Toolbox). Det er valgt å se nærmere på modellen med fire soner.

- Avgitt varme fra person ved 21 °C ved lett arbeid: 84 W/person
- Varme fra personer per BRA, referanseverdi Passivhus: «Kontorbygg»: 4 W/m²
- BRA: 1300 m²

For å finne antall personer i den Sone 2 og Sone 3 «Åpen løsning», kan man sette opp:

$$4 \text{ W/m}^2 \cdot 630 \text{ m}^2 = 2520 \text{ W}$$

$$\frac{2520 \text{ W}}{84 \text{ W/pers}} \approx 30 \text{ personer}$$

()

Beregningen viser at det vil befinne seg omtrent 30 personer i hver av de store sonene. Selv om det her er beregnet at det til sammen skal være omtrent 60 personer i det åpne landskapet er det valgt å implementere en økning på 20 personer i hver av disse sonene i IDA ICE. Dermed vil det befinne seg 50 personer i både Sone 2 og Sone 3.

Antall personer per BRA vil da være

$$\frac{50 \text{ personer}}{630 \text{ m}^2} \approx 0,08 \text{ personer / m}^2$$

Grunnen til denne økningen er det åpne kontorlandskapet, som gir mulighet for en større andel personer på mindre flater. I tillegg er det antatt at det vil komme mennesker på besøk til f.eks. møter eller intervjuer. For Sone 1 og Sone 4 er antallet satt til 6 personer. Driftstiden oppgitt for et kontorbygg i NS 3031 kan sees i Tabell 9.

Tabell 9: Driftstid for referansebygget, kontorbygg, etter NS 3031

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

Det er antatt et aktivitetsnivå på 1,2 met for brukerne i bygget. For kontorbygget vil det kunne være tilstedeværelse i bygget fra klokken 7.00 på morgenen til 19.00 på ettermiddagen/kveldstid. Tidsplan for personbelastning kan sees i Tabell 10.

Tabell 10: Tilstedeværelse personer i kontorbygget

Klokkeslett	Tilstedeværelse [%]
07.00-08.00	25 %
08.00-11.00	80 %
11.00-12.00	25 %
12.00-16.00	75 %
16.00-19.00	10 %
19.00-07.00	0 %

Det vil alltid forekomme varmetap i en bygning både gjennom rør og ventilasjonskanaler. For dette bygget ble det valgt å sette varmetapene til «God» siden det antas at det nyoppførte bygget vil ha god isolasjonsevne og dermed lite varmetap gjennom rør og kanaler. Ved dette valget vil omtrent 2% av varme levert fra varmeanlegget gå tapt.

Tabell 11: Systemtap for varmedistribusjonssystemet

Systemtap	
Tap i varmen til sonene	2 % av varmen levert av anlegget
Tap i tilluftskanalen	0,26 W/m ² gulvareal

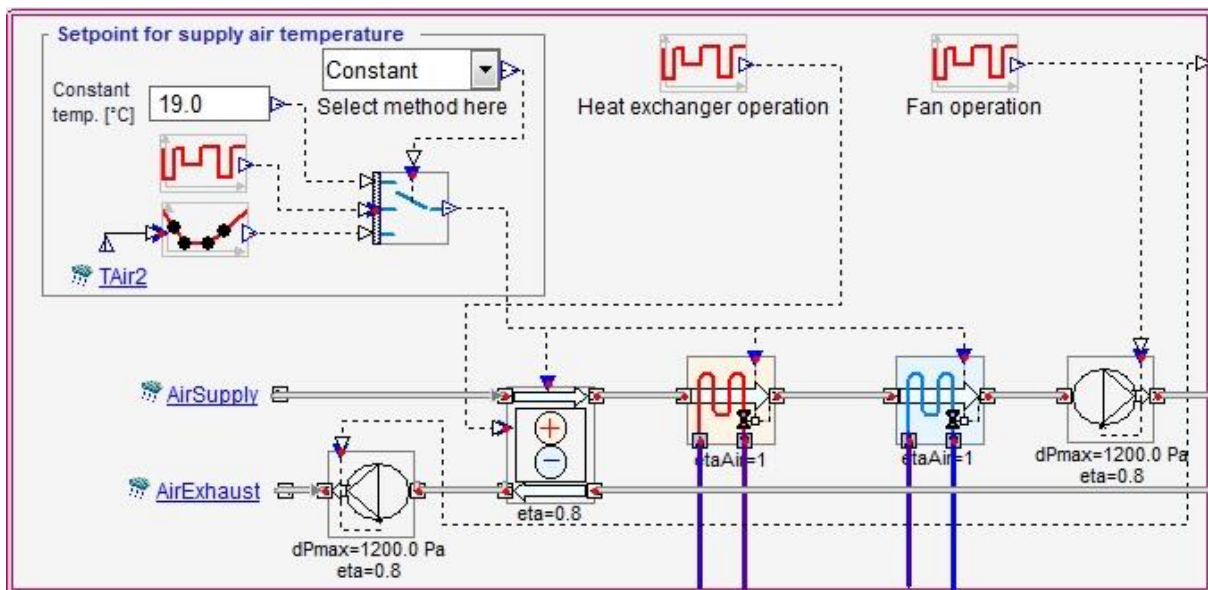
8.2 Ventilasjonssystem

For luftmengdene benyttes det verdier som ligger innenfor minste tillatte luftmengder. Ved passivhusvurdering skal det benyttes luftmengder beregnet etter standardisert person- og materialbelastning angitt i tillegg A i NS 3701, så lenge dette ikke gir lavere luftmengder enn minste tillatte gjennomsnittlige luftmengder. Minste gjennomsnittlige tillatte luftmengde ifølge NS 3701, er

6 m³/m²h i driftstid og 1 m³/m²h utenfor driftstid. Ved behovsstyring av ventilasjonen kan luftmengder reduseres med 20 %. Luftmengdeberegningen i referansebygget vises i *Vedlegg D. Luftmengdeberegning*.

Ventilasjonsystemet er basert på variabel luftmengde, VAV ventilasjon, og styres etter temperatur og CO₂ nivå. Spjeld styrer strømmen av luft til sonene. Det er antatt full omrøring i ventilasjonsanlegget og gradienten er dermed satt til 0. Den minste totale luftmengden i aggregatet ble satt til 10 800 m³/h med en konstant tilluftstemperatur på 19 °C.

Figuren under illustrerer oppbyggingen av ventilasjonsaggregatet for referansebygget. I tillegg til varmebatteriet er det lagt til et kjølebatteri for å kunne bruke ventilasjonskjøling på varme dager hvor temperaturen i sonene kan bli ukomfortabelt høy.



Figur 35: Oppbyggingen av ventilasjonssystemet i IDA ICE

Det er valgt å skru av ventilasjonssystemet i helgene og på helligdager da det er antatt at det ikke vil oppholde seg mennesker i kontorbygget. Det ble gjort en simulering for å se hvilken forskjell ventilasjonssystemet gjorde på energibruken dersom det ble slått helt av i helgene. Dette vises i *delkapittel 9.1 Energibruk og inn klima for referansebygget*. Det er antatt at viftene for aggregatene skal være radialvifter med bakoverbøyde skovler (kammervifter) med direktdrevne motorer for frekvensregulering. Denne typen vifter har høy virkningsgrad og den ble derfor satt til 80 % i ventilasjonsaggregatet.

8.3 Varmedistribusjonssystem

Det er fastsatt tilknytningsplikt for nye bygninger til fjernvarmeanlegg etter plan- og bygningsloven § 27-5. Nye bygninger skal derfor utstyres med varmeanlegg slik at fjernvarme kan nyttes for romoppvarming, ventilasjonsvarme og varmtvann, det er i tillegg antatt fjernkjøling i området. Fjernkjøling gir mulighet for full varmedekning. Som varmedistribusjonssystem i bygningen er det installert gulvvarme for å forsyne de forskjellige sonene med varme. Det vannbårne systemet skal varme opp rommene med gulvvarme og skal være utformet slik at det dekker varmtvann, rom- og ventilasjonsoppvarming. I følge NS 3031 vil systemets virkningsgrad når energiforsyningssystemet er fjernvarme, med vannbåren gulvvarme, være på 0,84.

For å finne ut dimensjoneringen av varmesystemet baseres det på en statisk simulering i IDA ICE. «Ideal heaters», ideelle varmeenheter, og «ideal coolers», ideelle kjøleenheter, blir installert i hver

sone. De ideelle enhetene blir brukt for å bestemme det maksimale varmebehovet uten interne varmetilskudd og med settpunkts temperaturer for oppvarming fra *NS 3031*. Det benyttes lokale klimadata til dette da prosentandelen av bygningens netto varmebehov, som den tiltenkte varmeløsningen kan forventes å dekke, kan være avhengig av lokalt klima. Derfor må dimensjoneringen av varmeanlegget ta utgangspunkt i lokale forhold (Norsk Standard, 2007b). Varmelastsimuleringen ble utført ved å kjøre simuleringen over ett døgn med dagene med maksimum og minimums temperaturer gitt ved DRY-klimafilen som vises i *VEDLEGG A. Klimadata*.

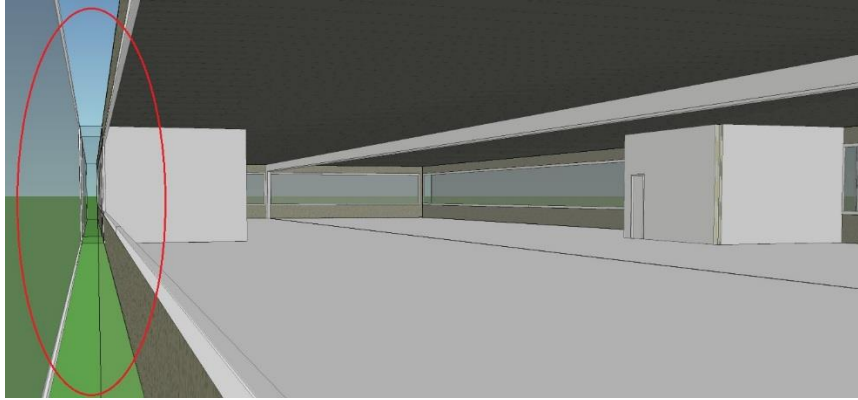
Dekningsgraden for en energikilde, det termiske energibehovet for oppvarming i bygg, fordeler seg på energi til romoppvarming, varmtvann og ventilasjonsoppvarming (Bryn et al., 2011). De spesifikke varme- og kjøleeffektene simulert for referansebygget er gitt i Tabell 13.

Varme- og kjølesystemet som er lagt inn i IDA ICE deler gulvkonstruksjonen i to deler, en under og en over systemet. For gulvvarme er det temperaturdifferansen mellom rommets temperatur og overflatetemperaturen på gulvet som bestemmer hvilken varmeavgivelse gulvarmen har til rommet. Massestrømmen ble satt til å være konstant med en maksimal temperaturdifferanse på 3 °C i gulvsystemet mens ΔT for systemet skal være på 5 °C. Oppvarming- og nedkjølingskretsen ble lagt inn 2 cm under overflaten med en varmeoverføringskoeffisient på 10 W/m²K. En PI-regulator ble valgt for å variere den utsendte effekten i henhold til lufttemperaturen i den tilsvarende sonen.

8.4 Dobbelfasade

Den doble fasaden er bygget opp etter prinsippet «korridorfasade». Selv om det i virkeligheten er muligheter for implementering av flere vindu bak den ytre glassfasaden vil de i denne modellen bli slått sammen til et stort vindu. Grunnen til dette er fordi simuleringsprogrammet IDA ICE ikke klarer å håndtere flere vindu bak den ytre fasaden. Den doble fasaden vil være oppbygd som en lukket buffer med ekstern luftstrøm som beskrevet i *delkapittel 4.2.3 Luftsirkulasjon for dobbelfasader*. Ved ekstern lukket luftstrøm vil det være to uavhengige systemer for ventilasjonen i oppholdssonen og i hulrommet. Siden bygget er et kontorbygg, vil det mest sannsynlig vil være plassert ved en trafikkert gate og dermed vil åpning av vinduer kunne føre til forurensning av luften i sonene. Den doble fasaden skal kunne gi god lydreduksjon og skjerme fra uønsket støy fra trafikk og andre støykilder som kommer fra omgivelsene utendørs. Hvor åpen fasaden er i mellomrommet og hvor god kvaliteten på glasset er, bestemmer hvor god støyreduksjonen er, og ved å åpne vinduene vil denne effekten kunne reduseres. Et problem som kan oppstå ved bruk av doble fasader er den reflekterende støy fra rom i nærheten. Altså vil det være nødvendig å ha vinduene i sonene lukket både for å unngå at støv og partikler finner veien inn i rommet, og også for å unngå støyen fra nærliggende rom og trafikkerte gater.

Som referanse settes den ytre fasaden til være ett-lags glass mens den indre fasaden vil være to-lags glass. Oppbyggingen av den doble fasaden ble gjort i simuleringsverktøyet ParaSol for å finne riktig U-verdi, g-verdi og transmisjon. Deretter ble den gjenskapt i IDA ICE, hvor den innerste fasaden i referansebygget, altså vinduet, vil bestå av to-lags lavemitterende glass med argonfylling. Den ytre fasaden vil bestå av et ett-lags glass, Single Clear. For referansebygget er g-verdi på glasset 0,5, med en U-verdi på 1,1 W/m²K. Både g-verdi og U-verdien er for stor i forhold til kravene i *NS 3701*, men vil bli justert og endret til å oppfylle kravene i løpet av scenarioene. Oppbyggingen av glassene vises i *VEDLEGG B.4 Scenario 1: ParaSol - Oppbygging av doble fasader*. Figur 36 viser den prinsipielle oppbyggingen av den doble fasaden i IDA ICE, hvor glassfasaden vil strekke seg rundt hele den øverste etasjen i bygget.

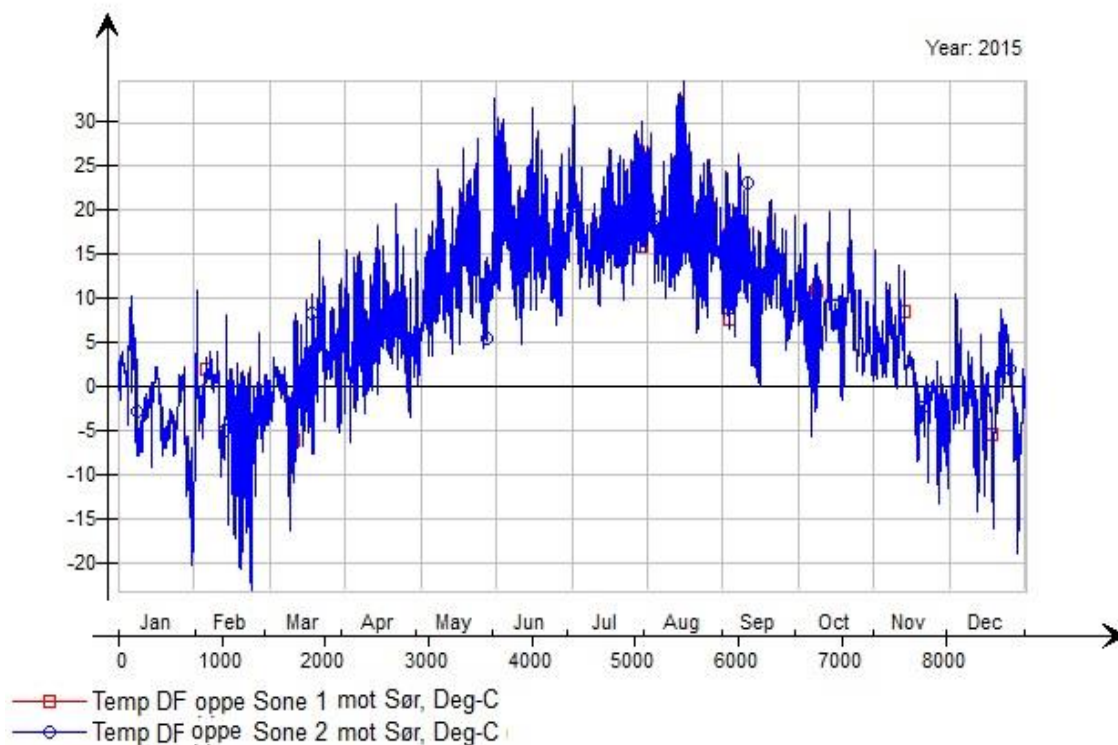


Figur 36: Prinsipiell oppbygging av den doble fasaden i IDA ICE

8.4.1 Korridorfasade

Siden det vil bli sett på en korridorfasade skal hulrommet mellom fasadene være lukket av horisontale skiller mellom hver etasje. Hulrommet skal være åpent vertikalt, slik at luften kan bevege seg fritt foran sonene i samme etasje. I IDA ICE vil det dermed kunne være nødvendig "koble sammen" glassfasaden som ligger utenfor sonene slik at luften skal kunne bevege seg vertikalt. Dette er for at sørfasaden får en heldekkende glassflate utenpå fasaden uten at det den var delt opp i ulike deler til hver sone, slik som modellen i prinsippet gjør.

Siden fasaden ikke er asymmetrisk antas det at solinnstrålingen vil være ganske lik over hele fasaden. Det ble derfor gjennomført en simulering med referansebygget, med prosentvis lik åpning mellom hulrommet og omgivelsene i forhold til størrelsen på den ytre glassfasaden. Figur 37 viser temperaturen ved åpningen i den øverste delen av hulrommet, for Sone 1 og 2 i den doble fasaden vendt mot sør.



Figur 37: Temperaturen ved åpningen i øvre del av hulrommet i den doble fasaden for Sone 1 og Sone 2

Som figuren illustrerer vil temperaturen øverst i hulrommet være lik for begge sonene. Derfor antas det at det ikke vil være nødvendig å gjøre modellen, med den doble fasaden, mer avansert ved å "koble" den ytre glassflaten for sonene sammen. Selv om det er antatt korridorfasade vil modellen altså være bygd opp med en dobbelfasade for hver sone, da det er tatt i betraktning den simuleringen som ble gjort med temperaturen i hulrommet. Dette valget er antatt å gi riktig resultat så lenge størrelsen på åpningene mellom omgivelsene og hulrommet er prosentvis like. Det vil ikke, som tidligere nevnt, være mulighet for åpning av vindu fra kontoret inn til hulrommet i dobbelfasaden. Grunnen til dette er risikoen for at brukeren slipper inn en del varme som ellers ikke ville kommet inn, i tillegg til muligheten for inntrenging av støv og støy fra omgivelsene.

8.4.2 Størrelse på åpningene og dybden på hulrommet

Det er viktig at størrelsen på åpningene fra omgivelsene til hulrommet er prosentvis like rundt hele bygget. Hvis ikke åpningene er like, vil temperaturen i hulrommet og luftstrømmen gjennom den være ulik for de ulike sonene og fasadene. Resultatet vil dermed ikke bli nøyaktig nok siden man i prinsippet ser på en korridorfasade. Det er valgt å se på åpningsstørrelsen i forhold til den tilhørende glassfasaden for å finne prosentvis like åpninger rundt hele etasjen. Dybden på hulrommet i referansebygget er satt til 0,6 m. Dette er den minste tillatte dybden som gjør det mulig å bevege seg i hulrommet på dersom det er behov for vedlikehold.

8.4.3 Solavskjermingssystem

Referansebygget vil være uten solavskjerming med naturlig ventilasjon gjennom den doble fasaden. Solavskjermingssystemet vil senere implementeres i ulike scenarier for å se hvilken påvirkning de har for varme- og kjølebehovet. Solavskjermingen kan plasseres innvendig, i hulrommet eller utvendig, og det er derfor nødvendig å finne ut hva som gir best resultat for inn klima og enerbruk i kontorbygget.

Et solavskjermingssystem må kunne kontrollere solvarmen for å redusere energien som trengs for kjøling, og på samme tid kontrollere innendørs dagslys og unngå blinding. Ved implementeringen i Scenario 4, er solavskjermingen automatisert og vil styres etter direkte solinnstråling. Når nivået på solinnstrålingen når 100 W/m² går persiennene ned. Vinkelen på solavskjermingen er valgt til å være 45° når denne skal implementeres.

8.4.4 Oppsummering

Tabell 12 viser en oppsummering av kriteriene for den doble fasaden i referansebygget.

Tabell 12: Kriterier for den doble fasaden til referansebygget

Type glass:	Innvendig Utvendig U-verdi	Dobbelglass: klart glass ytterst og Low_e_4% innerst Singel glass: Klart glass 1,1 W/m ² K
g-verdi glass		0,506
Dybde hulrom		0,6 m
Solavskjerming		Nei
Åpningsstørrelse		5 % av glassarealet
Ventilasjon		Naturlig

9 Resultat og analyse

For å kunne vurdere påvirkningen ved implementering av dobbelfasade i et kontorbygg utføres det dynamiske simuleringer i IDA ICE for ett helt år i et Oslo-klima med DRY-klimafil. I denne oppgaven er det lagt vekt på å se på hvordan energibruk og inneklima forandres ved simulering med de forskjellige scenarioene i referansebygget. Det blir i tillegg utført en parameteranalyse på en forbedret dobbelfasade som ser nærmere på hvilke faktorer som kan optimalisere oppbyggingen av den doble fasaden for å forbedre energibruk og inneklima. Videre vil det bli utført en klimadataanalyse som tar for seg ulike klimafil for Oslo samt hvordan endringer i ulike parametere i klimafil vil kunne endre det simulerte resultatet. Hovedfokuset i oppgaven ligger altså på hvilke tiltak i dobbelfasaden som gir en forbedring av energibruk og inneklima i bygningen. I en del figurer i oppgaven vil dobbelfasade refereres til som «DF» og operativ temperatur som «op.temp».

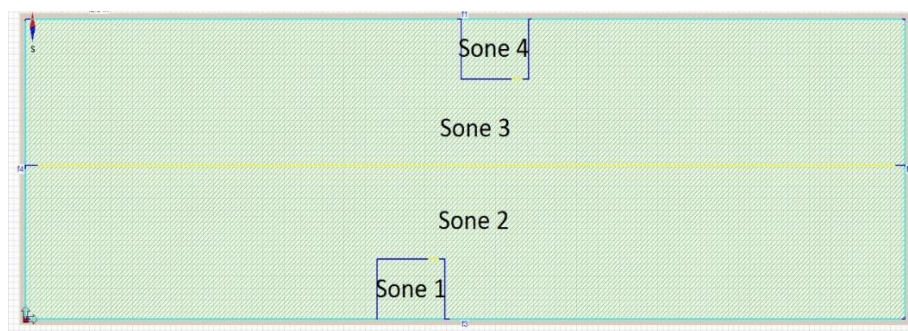
9.1 Energibruk og inneklima for referansebygget

Det første som ble gjort var å lage en referansemodell i IDA ICE, og denne seksjonen presenterer resultatene fra simuleringen med denne modellen. For å finne dimensjonerende varmeeffekt for hver sone og for å identifisere varmebehovet i bygget, ble det utført en varme- og energisimulering på referansebygget. Det ble sett på to forskjellige soneoppdelinger i referansebygget for å finne ut hvordan forskjellig antall soner ville påvirke energibehovet. Dimensjonerende varme- og kjøleeffekt for hver sone kan sees i Tabell 13. Det spesifikke varmebehovet inkluderer også energien som trengs for å dekke romoppvarming og oppvarming av ventilasjon. Resultatet spesifiserer effekten som må tilføres i alle rom fra gulvvarmesystemet for å opprettholde en lufttemperatur på 21°C i hver sone under dimensjonerende utetemperatur. Tabellen viser i tillegg total spesifikk varme- og kjølebehov for referansebygget med installert gulvvarme hvor varmesystemet er dimensjonert etter den dimensjonerende varmeeffekten til hver sone.

Tabell 13: Dimensjonerende varme- og kjøleeffekt for sonene i referansebygget

Sone	Gulvareal [m ²]	Effekt levert av ideelle varmere [W]	Dim. varmeeffekt [W/m ²]	Varme fjernet av ideelle kjølere [W]	Dim. kjøleeffekt [W/m ²]
Referansebygg 4 soner					
Sone 1	20	1508	75,4	2780	139,0
Sone 2	630	27819	44,2	33501	53,2
Sone 3	630	28623	45,4	14600	23,2
Sone 4	20	1480	76,5	812,4	40,7
Total spesifikk varme- og kjølebehov [kWh/m ²]			41,0		19,4
Referansebygg 7 soner					
Sone 1	20	1460	73	2747	137,3
Sone 2	213,5	16338	76,5	16643	77,9
Sone 3	213,5	16408	76,8	4590	22,0
Sone 4	20	1507	76,5	715	35,7
Sone 5	280	10074	36	13881	49,6
Sone 6	262,7	3038	12	5310	20,2
Sone 7	290,4	9064	32	15611	53,8
Total spesifikk varme- og kjølebehov [kWh/m ²]			42,7		19,6

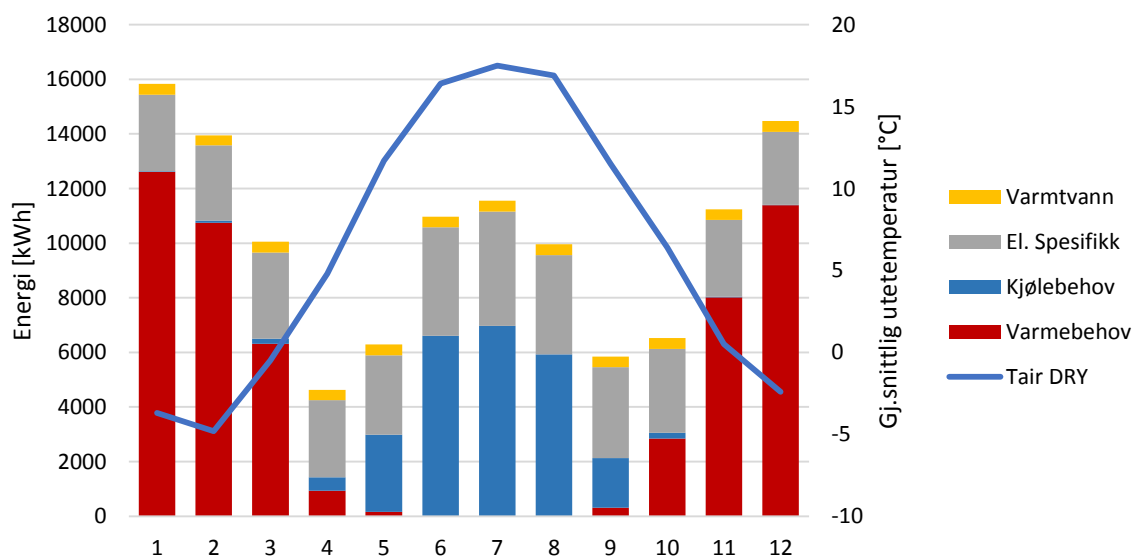
Det totale energiforbruket i bygget med fire soner er på 105,5 kWh/m², mens det ligger på 107,7 kWh/m² for referansebygget med sju soner. Altså vil energiforbruket være omtrent likt ved de to forskjellige soneoppdelingene i bygget og i tillegg vil temperaturen i sonene være omtrent det samme. Siden begge modellene gir nokså likt resultat med samme inndata, men med forskjellig soneinndeling, er det valgt at det bare vil bli sett på modellen med færrest soner. Modellen med færrest soner gir også færre parametere som det må endres på, samt at modellen bruker litt mindre tid på simulering i forhold til modellen med flere soner. Den valgte soneoppdelingen for referansebygget vises i Figur 38, hvor den gule streken indikerer åpen løsning mellom Sone 2 og Sone 3.



Figur 38: Valgt planløsning for referansebygget

Det ble også gjort en simulering med referansebygget for å se hvilken forskjell ventilasjonssystemet utgjorde på energibruken, dersom det ikke ble slått helt av i helgene. Ved å hele tiden ha på ventilasjonsanlegget, økte varmen fra ventilasjonsanlegget mens kjølingen ble redusert. Det totale energiforbruket økte til 112,6 kWh/m². Det ble dermed valgt at ventilasjonssystemet skulle være avslått i helgene og på helligdager da dette gav lavest energibruk.

Simuleringene viser at det totale spesifikke varme- og kjølebehovet for referansebygget, som sett i Tabell 13, er henholdsvis 41,0 kWh/m² og 19,4 kWh/m². Figur 39 viser det månedlige energibehovet for referansebygningen. Varmebehovet inkluderer romoppvarming og ventilasjon, kjølebehovet inkluderer romkjøling fra ventilasjon og fjernkjøling mens el.spesifikk er levert energi til bygningen og inkluderer elektrisitet for lys, utstyr, vifter og pumper.

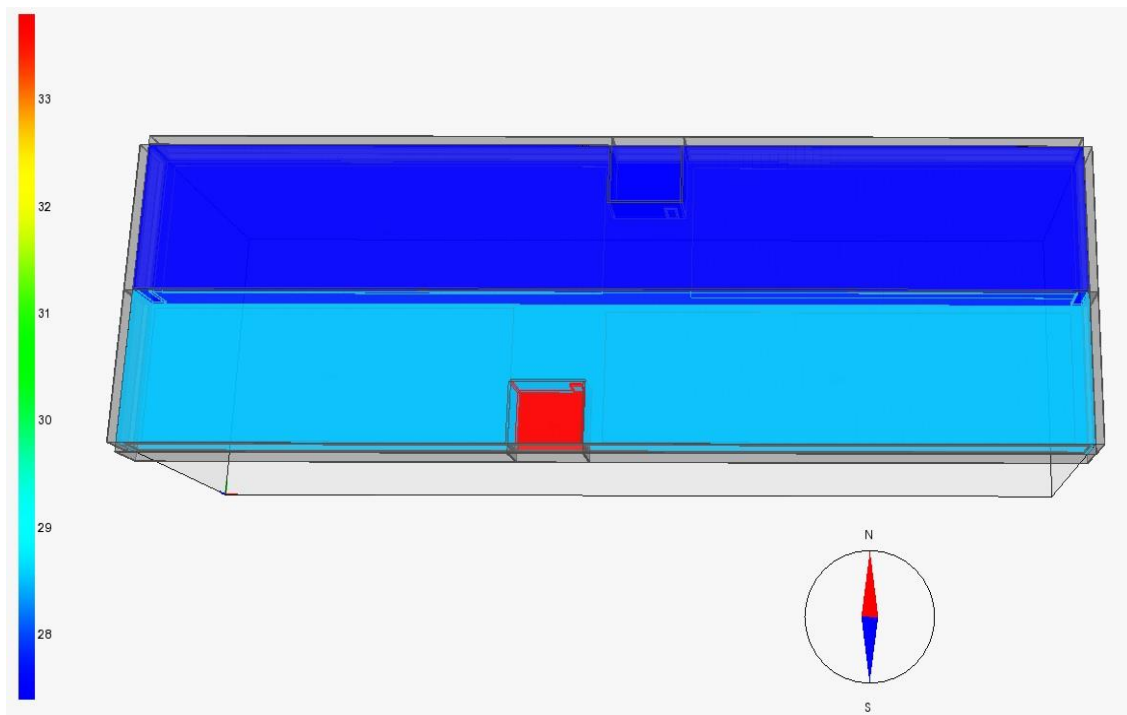


Figur 39: Månedlig energibehov for referansebygget

Den energien som trengs for å dekke varmebehovet for romoppvarming og varme til ventilasjon er på omtrent 53 300 kWh i året. Januar er den måneden med mest oppvarmingsbehov og hvor det er nødvendig med 12 600 kWh, altså omtrent 23 % av det totale varmebehovet. Som figuren viser er det ikke behov for romoppvarming i bygget fra juni til august, derimot er det behov for romkjøling disse månedene. På grunn av det store glassarealet, hvor det ikke er implementert solavskjerming, vil det være nødvendig å bruke kjølebatteriet i romventilasjonen samt fjernkjøling for å opprettholde en temperatur i bygget som er tilfredsstillende på dager med mye varme og solinnstråling.

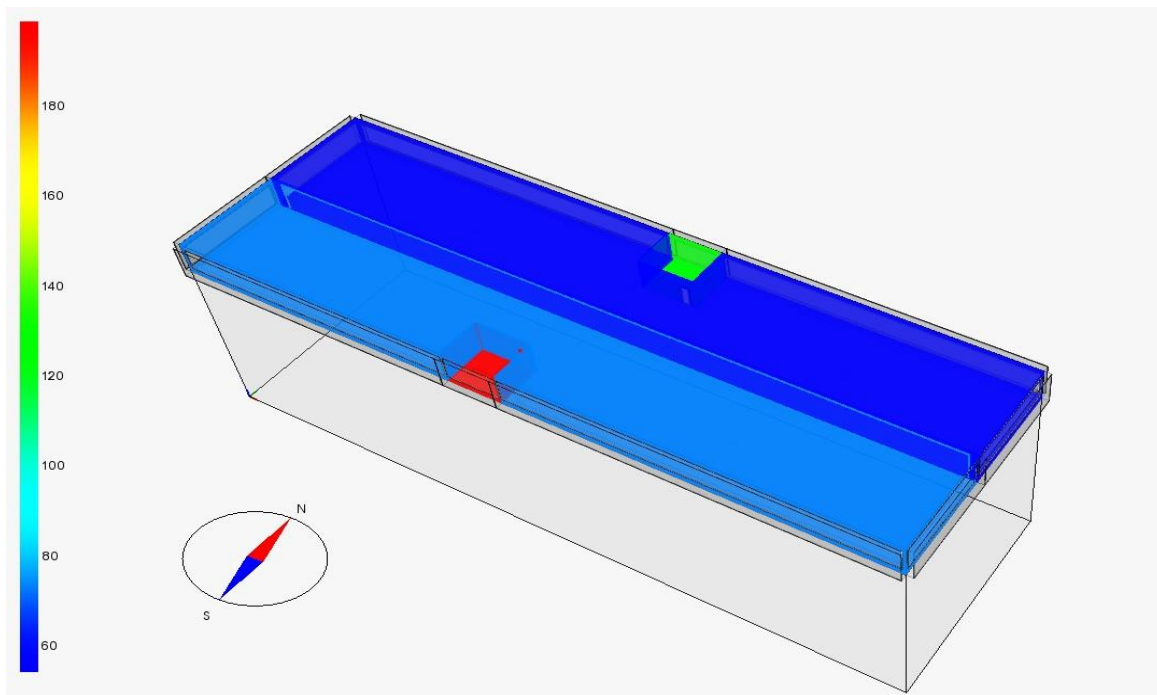
Det totale energiforbruket i bygget er på 105,5 kWh/m², og vil altså ikke møte energirammekravet for kontorbygg etter passivhusstandarden, som er på 95 kWh/m². Årsaken til at man ikke oppnår de gitte kravene for energibruk, kan være at U-verdien på vinduene og den doble fasaden i referansebygget ikke møter de kravene som er satt for U-verdiene i passivhusstandarden. I tillegg består etasjen av store vindusflater og det er antatt at de vil utgjøre nok til å øke energibudsjettet. Det antas at både kjølebehov og varmebehov vil reduseres ved bedre U-verdi samt innføring av et solavskjermingssystem i den doble fasaden.

Operativ temperatur og maksimum tilført solvarme til hver sone i bygningen kan sees i Figur 40 og Figur 41.



Figur 40: Maks operativ temperatur for referansebygget [°C]

Maks operativ temperatur i løpet av året befinner seg i Sone 1 som er ligger i kontorbyggets sørfasade, som vist i Figur 40. Som figuren illustrerer vil det være forskjellige soner som oppnår de høyeste temperaturene. Her vises det at sonene som er vendt mot nord vil ha en gjennomsnittlig lavere operativ temperatur sammenlignet med sonene vendt mot sør. Den operative temperaturen i sonene er avhengig av flere faktorer, men særlig solinnstrålingen. Når fasaden ikke har implementert solavskjerming vil mye solvarme kunne slippe inn i sonene. En fasade som er orientert mot nord vil ikke ha like mye solinnstråling som en sørfasade, slik som Figur 41 viser.

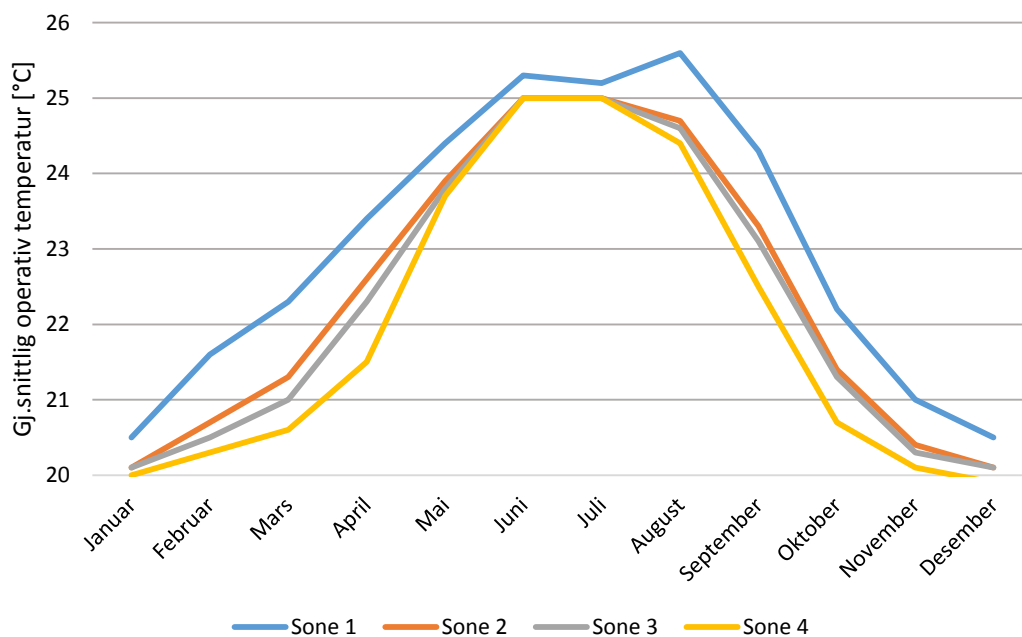


Figur 41: Maksimum solvarme i de ulike sonene [W/m²]

Maksimum soltilførsel befinner seg også i Sone 1 på 180 W/m² som illustrert i Figur 41. Som tidligere nevnt vil solinnstrålingen på vinteren kunne gi et varmetilskudd som vil være gunstig å utnytte. I sommerperioden kan soltilskuddet føre til at rom blir for varme og det kan dermed være nødvendig å stenge solstrålene ute. Dette vises i både i Figur 40 og Figur 41, hvor Sone 1 vil kunne få ukomfortable høye temperaturer.

Inneklime for referansebygget

En simulering over ett år ble gjort for å analysere innendørsklimaet i referansebygget med den doble fasaden. Figur 42 viser den gjennomsnittlige operative temperaturen for sonene i referansebygget.



Figur 42: Gjennomsnittlig operativ temperatur for sonene i referansebygget

For alle månedene vil den gjennomsnittlige operative temperaturen være høyest i Sone 1, mens Sone 4 som er vendt mot nord, er den sonen som opererer med gjennomsnittlig lavest operativ temperatur gjennom året. Sammenligningen av CO₂-nivå, maks- og minimum operative temperaturer, samt årlig gjennomsnittlig operativ temperatur vises i Tabell 14.

Tabell 14: Innendørstemperaturer og CO₂-nivå til referansebygningen

Soner	Maks op. temperatur [°C]	Min op. temperatur [°C]	Årlig gj.snitt temp. [°C]	Årlig gj.snitt CO ₂ -nivå [ppm]
Sone 1	33,8	19.5	23,0	494,8
Sone 2	28.5	19.6	22,4	432,4
Sone 3	27.4	19.6	22,3	432,5
Sone 4	27.4	18.3	22,0	517,0

Tabell 14 viser at alle sonene har tilfredsstillende CO₂-nivå, siden ingen av dem på noen som helst tidspunkt overstiger grensen på 1000 ppm. Som tabellen viser kan den operative temperaturen i sonene bli høy, hvor den høyeste befinner seg i Sone 1 og er på hele 33,8 °C. Denne temperaturen vil redusere den termiske komforten betraktelig for denne sonen. På grunn av høyest operative temperaturer samt høyest solinnstråling er det valgt å ha hovedfokus på Sone 1, altså teamrommet som er vendt mot sør. Denne sonen vil det bli sett nærmere på når det skal sees på termisk komfort, slik at man kan studere den «verste» sonen i modellen.

9.1.1 Referansebygget med og uten dobbelfasade

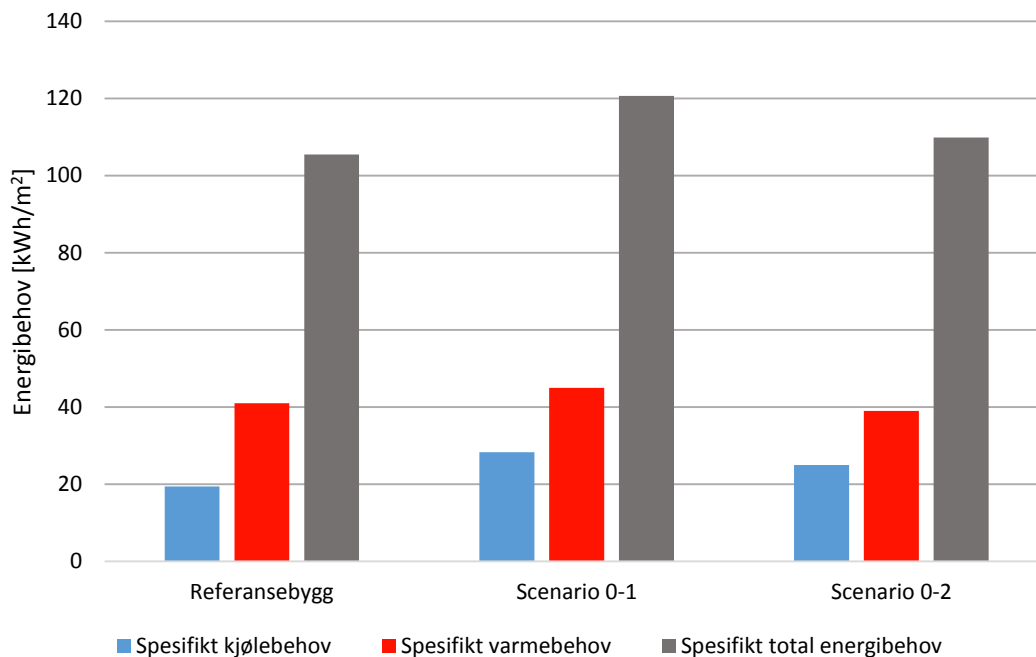
For å undersøke om den doble fasaden vil kunne påvirke energibudsjettet og inneklimate i kontorbygget, er det valgt å se på levert energi til bygningen både med og uten den doble fasaden. Tabell 15 viser U-verdi, g-verdi og transmittans for den doble fasaden i referansebygget og scenarioene med en enkel fasade med stort vindu. Størrelsen på vinduene i enkeltfasaden er den samme som på vinduene i innerfasaden for referansebygget.

Tabell 15: U-verdi, g-verdi samt transmittans til fasaden både med og uten dobbelfasade

	U-verdi [W/m ² K]	g-verdi [-]	Transmittans - sol [-]
Referansebygg	1,1	0,506	0,376
Scenario 0-1	1,42	0,613	0,613
Scenario 0-2	1,12	0,529	0,386

Som tabellen viser vil referansebygget og Scenario 0-2 være ganske like for disse parameterne. Referansebygget har en U-verdi på dobbelfasaden på rundt 1,1 W/m²K, og uten det ytterste glasset vil vinduene ha en U-verdi på 1,42 W/m²K som da vil betegnes som Scenario 0-1 i tabellen. Scenario 0-2 vil ha en U-verdi på 1,12 W/m²K som er nesten lik U-verdi som referansebygget. Oppbyggingen for scenario 0-1 og 0-2 vises i VEDLEGG B.3 Scenario 0: ParaSol og IDA ICE - Oppbygging av doble fasader.

De ulike scenarioene sammenlignes for å se hvordan energibruken og inneklimate i kontorbygget vil bli påvirket. Det totale energibehovet samt spesifikk varme- og kjølebehov vises i Figur 43.

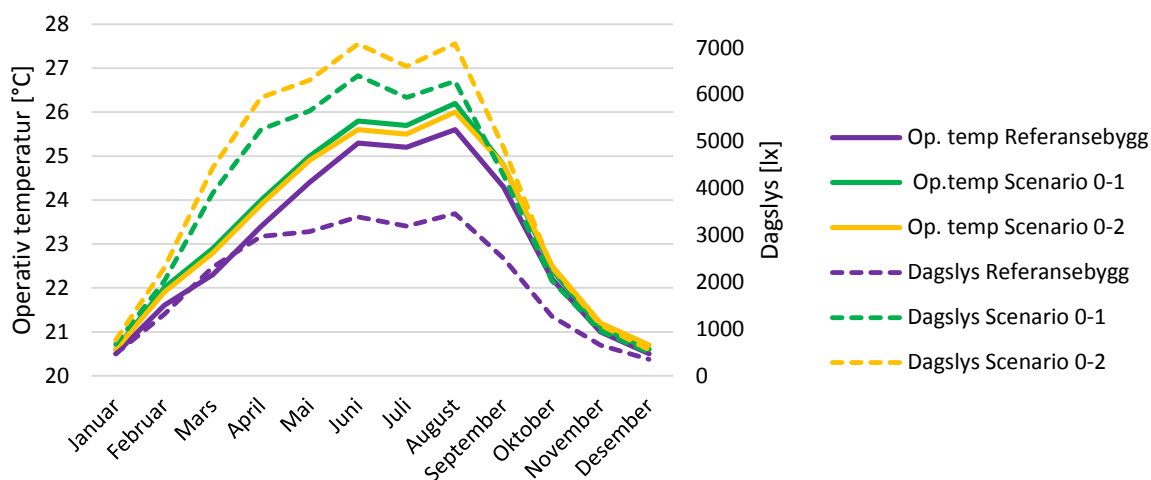


Figur 43: Spesifikt energibehov for referansebygget med og uten dobbelfasade

Som Figur 43 illustrerer er både varme-, kjøle- og det totale energibehovet avhengig av U-verdi, g-verdi og transmittans på fasaden. Selv om energibehovet ikke endres drastisk, kan en se at med nesten samme U-verdi både med og uten den doble fasaden vil den doble fasaden ha behov for mindre kjøling enn det den vanlige fasaden har. Kjølebehovet i referansebygget med den doble fasaden er omtrent 32 % lavere sammenlignet med Scenario 0-1 og nesten 22 % lavere sammenlignet med Scenario 0-2. Simuleringen med dårligst U-verdi og uten den doble fasaden, Scenario 0-1, har både høyest spesifikk kjøle- og varmebehov. Her vil ekstra varme gå tapt gjennom glasset på grunn av den dårlige U-verdien.

Simuleringene gjort av Høseggen et al. (2008) viste at varmebehovet var omtrent 20 % høyere for en vanlig fasade med en ordinær vindusløsning sammenlignet med alternativet med dobbelfasade. Som simuleringene viser for dette kontorbygget, vil varmebehovet for Scenario 0-1, med en vanlig fasade være omtrent 10 % høyere enn referansebygget med dobbelfasade. Ved å endre til vinduer med en forbedret U-verdi i den ordinære fasaden, gir det muligheter for at forskjellen i energibehovet blir jevnet ut (Høseggen et al., 2008). Dette vises også i simuleringene gjort for dette bygget, da energibruket vil være omtrent likt for referansebygget og scenario 0-2.

På grunn av den store forskjellen i kjølebehovet, er det valgt å se hvordan den gjennomsnittlige operative temperaturen og dagslyset i Sone 1 muligens har blitt påvirket av endringen. I følge Poirazis (2004) vil det forekomme en reduksjon i mengden dagslys som kommer inn i rommene som et resultat av den ekstra glassfasaden. Den gjennomsnittlige operative temperaturen og dagslyset gjennom året, i Sone 1, er vist i Figur 44. Den gjennomsnittlige operative temperaturen vil i Sone 1, både med og uten den doble fasaden, være høy i sommermånedene for kontorbygget.



Figur 44: Gjennomsnittlig operativ temperatur og dagslys (ved første kontorpult) både med og uten dobbelfasade i Sone 1

Som figuren illustrerer vil den gjennomsnittlige operative temperaturen ligge over 25 °C i sonen fra juni til august. For Scenario 0-1 og 0-2 vil den operative temperaturen være høyere i sommermånedene, men omtrent lik referansebygget med den doble fasaden i vintermånedene.

Det ekstra laget av glass, som gir den doble fasaden, er antatt at vil gi en forverring av naturlige dagslysforhold i sonene. I følge Oesterle (2001) vil den ekstra glassfasaden, dersom det består av et enkelt lags klart glass, gi en reduksjon på minst 10 %. I simuleringene gjort mellom referansebygget og Scenario 0-1, hvor det er lagt til den ytre glassfasaden i referansebygget, vil dagslysforholdene gjennomsnittlig over året gi en reduksjon på 40 % i Sone 1, som vist i Figur 44. Dette viser klart at en dobbelfasade vil redusere dagslyset i sonene innenfor.

Termisk komfort

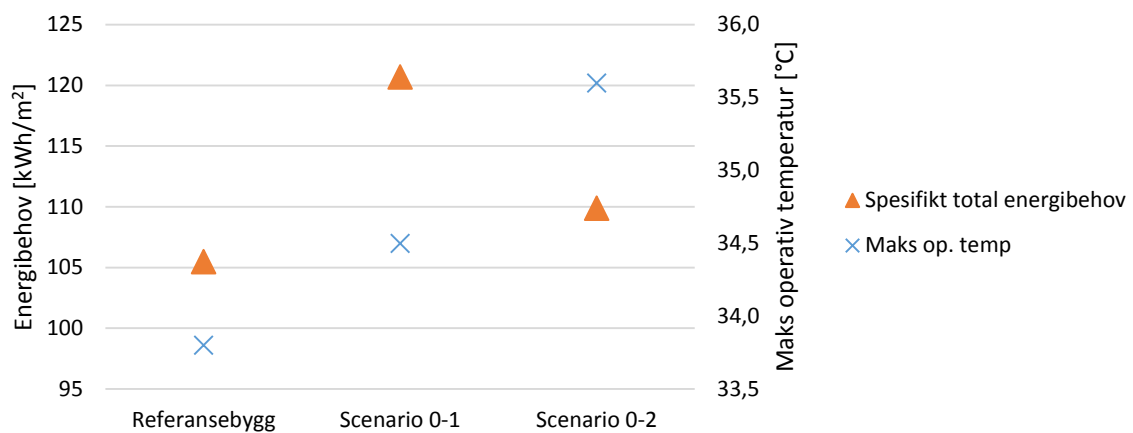
Når man ser på den termiske komforten har verdiene i IDA ICE tatt hensyn til PPD og PMV (IDA ICE sin egen kilde er standarden NS EN 15251:2007). Det ble tatt utgangspunkt i den sonen som er varmest på sommeren for å se på det dårligste tilfellet innen termisk komfort i bygningen. Denne sonen er som tidligere nevnt, Sone 1. I følge Poirazis (2004) så kan den interne delen av fasaden opprettholde temperaturer som er tettere til et nivå for termisk komfort i forhold til en enkelt fasade i en varmeperiode. Grunnen til dette er fordi luften i hulrommet er varmere enn utendørstemperaturen på grunn av hulrommet, og dermed kan dette utnyttes på en god måte i vintermånedene. Tabell 16 viser den termiske komforten i Sone 1 for de tre tilfellene.

Tabell 16: Termisk komfort, Sone 1

Sone 1 Komfortkategori	Prosentvis tid av okkuperte timer		
	Referansebygg	Scenario 0-1	Scenario 0-2
I – Best	53 %	48 %	50 %
II – Bra	61 %	55 %	57 %
III – Akseptabelt	69 %	63 %	65 %
IV - Uakseptabelt	31 %	37 %	35 %

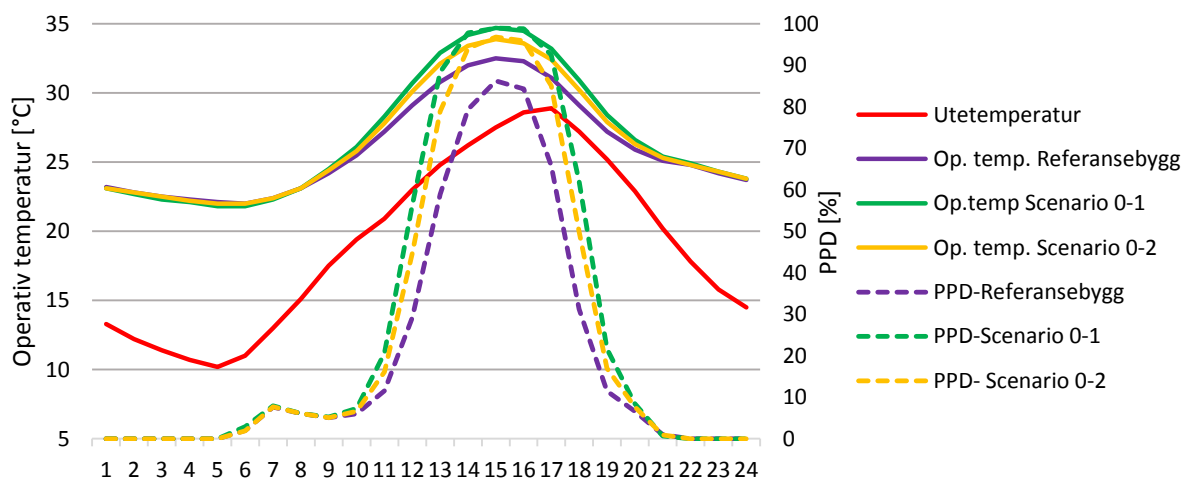
Referansebygget har 31 % uakseptabel PMV og PPD verdier under driftstid, mens tilfellene uten den doble fasaden har økt til 37 % og 35 % for henholdsvis Scenario 0-1 og 0-2. En av grunnene til den økte uakseptable PMV- og PPD-verdiene kan være den økte operative temperaturen som vist i Figur 44, da denne har økt for begge tilfellene uten den doble fasaden.

Figur 45 viser energibehovet samt den maksimale operative temperaturen for referansebygget og scenarioene uten den doble fasaden. Den maksimale operative temperaturen i Sone 1 er i figuren referert til som «Maks op. temp».



Figur 45: Energibehov for referansebygget og maks operativ temperatur i Sone 1, med- og uten dobbelfasade

Som Figur 45 og Figur 46 viser vil maks operativ temperatur bli høyere i tilfellene uten den doble fasaden. Dette indikerer at hulrommet i en dobbelfasade vil kunne gi en jevnere kurve for den operative temperaturen i sonen den er tilknyttet. Dette vises også i Figur 44, hvor den gjennomsnittlige operative temperaturen i referansebygget ligger på et lavere nivå enn for de to andre tilfellene. Hvis man sammenligner dette med den termiske komforten i Tabell 16 kan en se at Scenario 0-1 og 0-2 vil ha et økende nivå på uakseptabel PPD- og PMV-verdi. Figur 46 viser hvordan PPD i sonen varierer med den operative temperaturen. Her er det tatt et utdrag fra den dagen hvor det oppstår høyest operativ temperatur i Sone 1 for alle tre scenariene. Selv med samme U-verdi på referansebygget og Scenario 0-2 vil både PPD og den operative temperaturen for referansebygget holde seg på et lavere nivå enn for Scenario 0-2, og dette er en gjentakende hendelse.



Figur 46: PPD-verdi og operativ temperatur den dagen med flest misfornøyde 13/8-2015, for Scenario 0-1 og 0-2, Sone 1

Som figuren viser vil PPD-verdien være sterkt avhengig av temperaturen innendørs, som igjen er avhengig av temperaturen utendørs. Den doble fasaden vil altså kunne forbedre den termiske komforten dersom det bare blir sett på operativ temperatur og PPD-nivået i sonene.

9.2 Påvirkning ved endringer i den doble fasaden for referansebygget

Dette delkapittelet presenterer resultatene for endringer i dobbelfasaden for de forskjellige scenarioene i referansebygget, med fokus på energibruk og innneklima. Scenarioene tar utgangspunkt i de mest kritiske parameterne som ble funnet i *kapittel 4 Doble fasader*. Det er sett nærmere på utformingen og U-verdien på glassene, endring i dybde og åpningsareal mellom omgivelsene og hulrommet samt plassering av solavskjermingssystemet i den doble fasaden. Det er også her valgt å se på Sone 1 når termisk komfort skal analyseres.

Tabell 17 gir en oversikt over de ulike scenarioene som skal gjennomføres for den doble fasaden. En mer detaljert oversikt av scenarioene ble gjennomgått i *delkapittel 6.3 Scenarier for analyse av den doble fasaden*.

Tabell 17: De ulike scenarioene som skal gjennomføres for den doble fasaden

Scenario 1: U-verdi	
Scenario 1-1	Indre: 2-lags glass. Ytre: 2-lags glass – U-verdi 0,82 W/m ² K
Scenario 1-2	Indre: 2-lags glass. Ytre: 2-lags glass – U-verdi 0,73 W/m ² K
Scenario 1-3	Indre: 3-lags glass. Ytre: 1-lags glass – U-verdi 0,8 W/m ² K
Scenario 1-4	Indre: 3-lags glass. Ytre: 1-lags glass – U-verdi 0,7 W/m ² K
Scenario 2: Åpningsareal mellom hulrommet og omgivelsene	
Scenario 2-1	0 % av glassarealet
Scenario 2-2	10 % av glassarealet
Scenario 2-3	15 % av glassarealet
Scenario 3: Hulrommets dybde	
Scenario 3-1	0,4 m
Scenario 3-2	0,8 m
Scenario 3-3	1,0 m
Scenario 4: Solavskjerming	
Scenario 4-1	Solavskjerming på innsiden
Scenario 4-2	Solavskjerming i hulrommet: 1/3 mot vindu
Scenario 4-3	Solavskjerming i hulrommet: Midten
Scenario 4-4	Solavskjerming i hulrommet: 1/3 mot glassfasade
Scenario 4-5	Solavskjerming på utsiden

Når disse ulike scenarioene er utført på kontorbygget og den doble fasaden, vil det deretter gis et sammendrag og en liten analyse av de ulike scenarioene i *delkapittel 9.3 Sammendrag av analysen med referansebygget*. Her vil man få en overordnet oversikt som skal gjøre det lettere å se hvilke tiltak som vil forbedre dobbelfasaden. Den «beste løsningen» på dobbelfasaden finnes i henhold til energibruk og innneklima som er basert på de ulike simuleringene som blir gjort i dette delkapittelet.

9.2.1 Effekt av U-verdi på dobbelfasaden

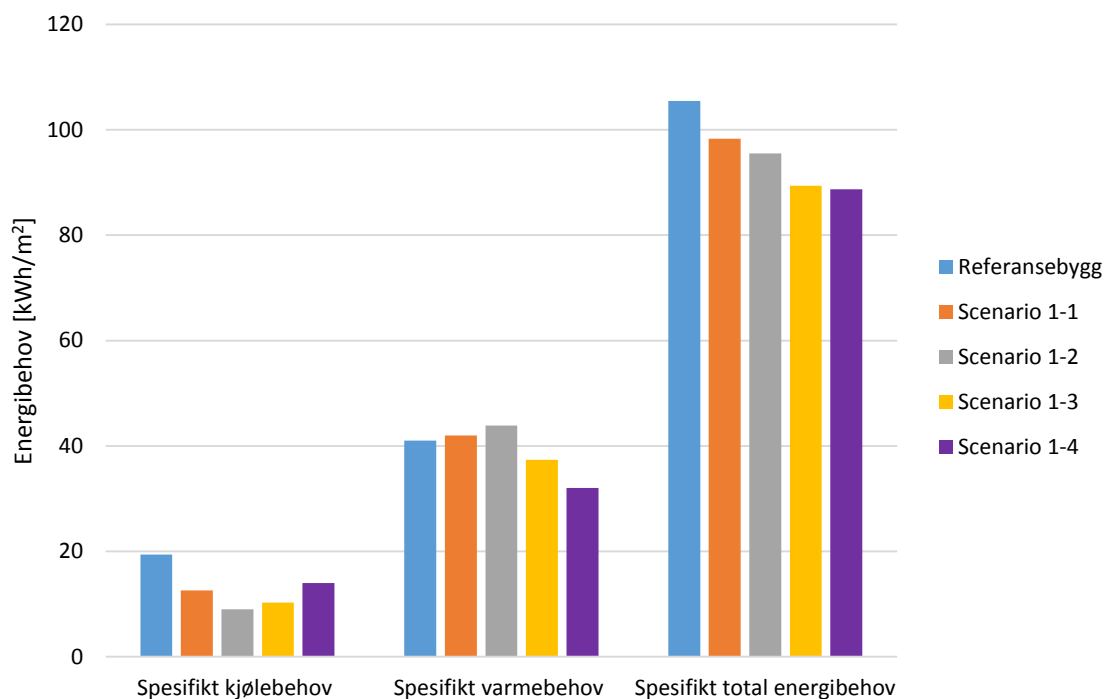
For å sjekke om dobbelfasadens U-verdi og antall glass i indre og ytre fasade vil ha noen effekt på energibudsjettet til bygningen er det fremstilt en sammenligning med referansebygget og Scenario 1-1 til 1-4. Tabell 18 viser U-verdi, g-verdi samt transmittans for oppbyggingen av de ulike scenarioene i den doble fasaden.

Tabell 18: U-verdi, g-verdi og transmittans for oppbyggingen av de ulike scenarioene i den doble fasaden

	U-verdi [W/m ² K]	g-verdi [-]	Transmittans - sol [-]
Referansebygg	1,1	0,506	0,376
Scenario 1-1	0,82	0,448	0,306
Scenario 1-2	0,73	0,375	0,233
Scenario 1-3	0,80	0,339	0,233
Scenario 1-4	0,70	0,437	0,284

Som en kan se av tabellen, vil g-verdien, transmittansen og U-verdi være avhengig oppbyggingen på glassene. Her vil det være forskjell på om det brukes to-lags glass eller ett-lags glass ytterst, og hvilke glasstyper som blir brukt i oppbyggingen. Oppbyggingen av de ulike scenarioene vises i *VEDLEGG B.4 Scenario 1: ParaSol - Oppbygging av doble fasader*.

Figur 47 viser det spesifikke energibehovet for de ulike scenarioene i Scenario 1.



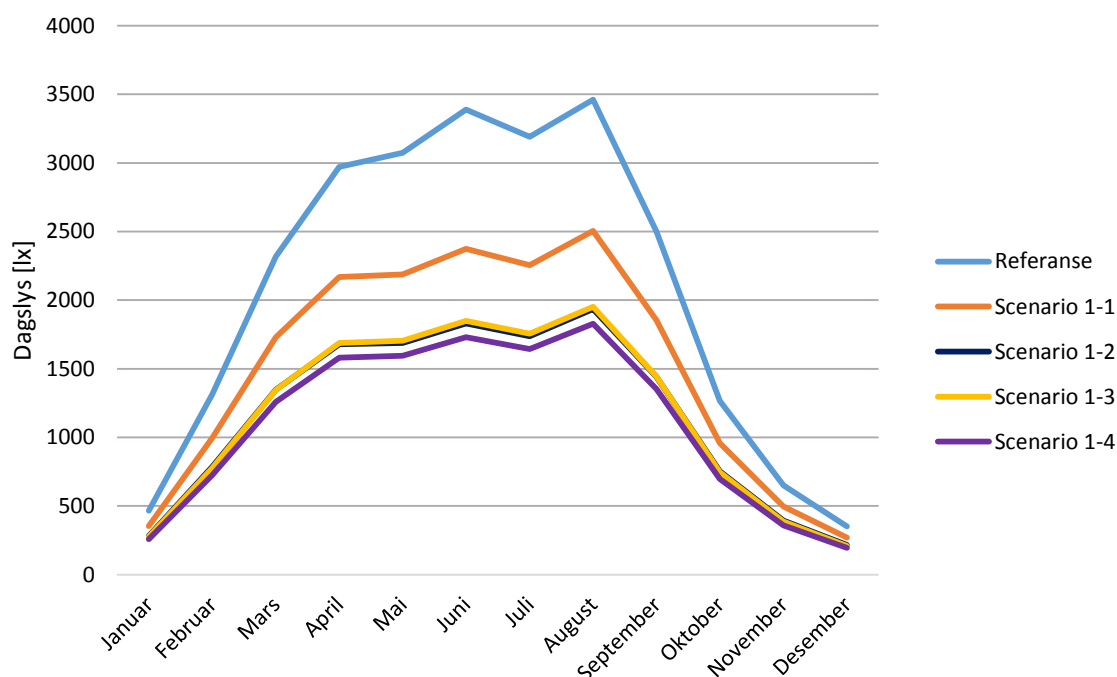
Figur 47: Spesifikt energibehov for Scenario 1 ved ulik U-verdi, g-verdi og transmittans

Den største forskjellen i det spesifikke energibehovet forekommer for Scenario 1-4 og vises i Figur 47. Det totale spesifikke energibehovet er redusert med omtrent 17,5 kWh/m² sammenlignet med referansebygget. For samme scenario er det spesifikke varmebehovet redusert med 9 kWh/m² og kjølebehovet med 5,4 kWh/m² fra referansebygget. Energibehovet vil altså reduseres med forbedret U-verdi som figuren viser. Figuren viser også at ved å bruke tre-lags glass innerst og ett-lags glass ytterst reduseres det totale energibehovet sammenlignet med scenario 1-1 og 1-2 hvor det er brukt dobbelglass både innerst og ytterst. Det spesifikke kjølebehovet er minst i Scenario 1-2, hvor det kan

tenkes at mye av solinnstrålingen vil hindres i å komme inn i hulrommet på grunn av dobbelglass i ytterfasaden. Dette gjør at den operative temperaturen i sonen innenfor vil reduseres, som vist i Figur 49. Dobbeltglasset vil også stenge mer solinnstråling ute på vinterstid, og dermed vil ikke hulrommet varmes opp for å kunne utnyttes som en termisk buffer. Resultatene viser altså at bruk av dobbelglass i ytterfasaden vil øke varmebehovet på vinterstid.

Som nevnt i *delkapittel 2.1.2 Passivhus*, skal netto energibehov for romoppvarming være 20 kWh/m²år for et kontorbygg over 1000 m² som følger passivhusstandarden med beliggenhet i Oslo. Ingen av de utvalgte scenarioene i Scenario 1 oppfyller kravet til varmebehovet. Det scenariet som kommer nærmest dette kravet er Scenario 1-4 med spesifikt varmebehov på 32 kWh/m²år.

Dagslys er en viktig faktor for trivsel i et kontorbygg, og hvordan dagslyset endres ved antall glass i fasaden samt endring i glassets egenskaper vises i Figur 48.



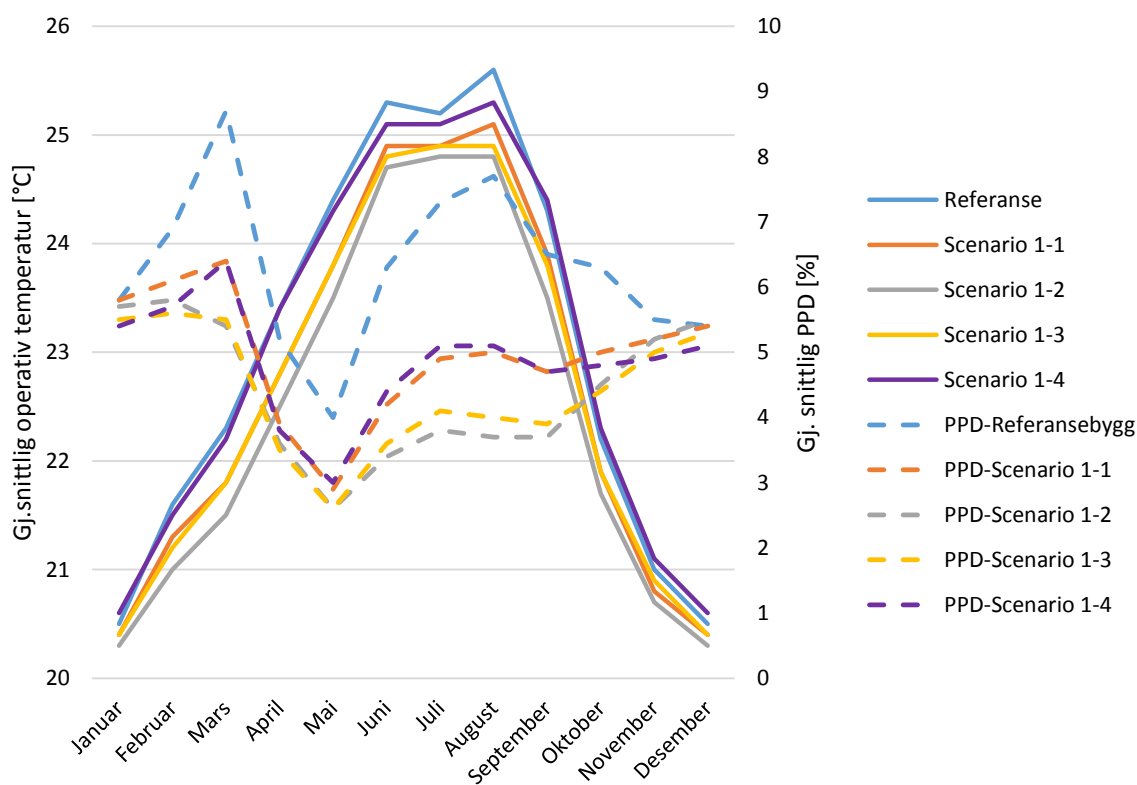
Figur 48: Dagslys i Sone 1 ved første kontorpult for Scenario 1

Scenarioet med den beste U-verdien, scenario 1-4, er det scenarioet som slipper igjennom minst dagslys. Dette bør det tas hensyn til ved valg av materialer til den doble fasaden. Solbeskyttende glass har lavere lystransmisjon enn klart glass og dermed vil samme areal kunne gi lavere dagslysforhold (Erichsen & Horgen AS, 2007). Figur 48 indikerer at referansebygget, som har høyest transmittans, g-verdi og dårligst U-verdi, vil være den som slipper igjennom mest dagslys. Siden det ikke er implementert solavskjerming vil det ikke være noen problemer med dagslysforholdet i noen av scenarioene i Scenario 1 i referansebygget slik som Figur 48 viser.

Dagslysfaktoren er beregnet ut fra verdien på dagslyset ved den første kontorpulten i Sone 1, da det er vanskelig å finne den gjennomsnittlige dagslysfaktoren. Om dette vil gi et reelt bilde av den gjennomsnittlige dagslysfaktoren er ikke sikkert, men den vil likevel gi en liten indikasjon på hvordan dagslysforholdet i sonen forandrer seg med ulik utforming på dobbelfasaden. Ved å bruke Ligning 22 fra *delkapittel 4.4.4 Aktinisk miljø*, kan dagslysfaktoren i Sone 1 finnes. Som tidligere nevnt vil solhøyden i mars være på 30° i Oslo og da vil dagslysfaktoren ved kontorpulten ved vinduet være omtrent 8,3 % for scenario 1-4, som slipper inn minst dagslys av scenarioene. Kravene som er satt i

TEK 10 er dermed fulgt. Likevel viser figuren at utnyttelsen av dagslys i et kontorbygg med dobbelfasade er avhengig av den totale g-verdien, U-verdien samt transmittansen til dobbelfasaden. Figuren viser at for disse scenarioene så vil bedre U-verdi, gi dårligere dagslys i Sone 1.

Figur 49 viser sammenhengen mellom månedlig gjennomsnittlig PPD og gjennomsnittlig operativ temperatur.



Figur 49: Gjennomsnittlig operativ temperatur per måned for referansebygget og scenario 1

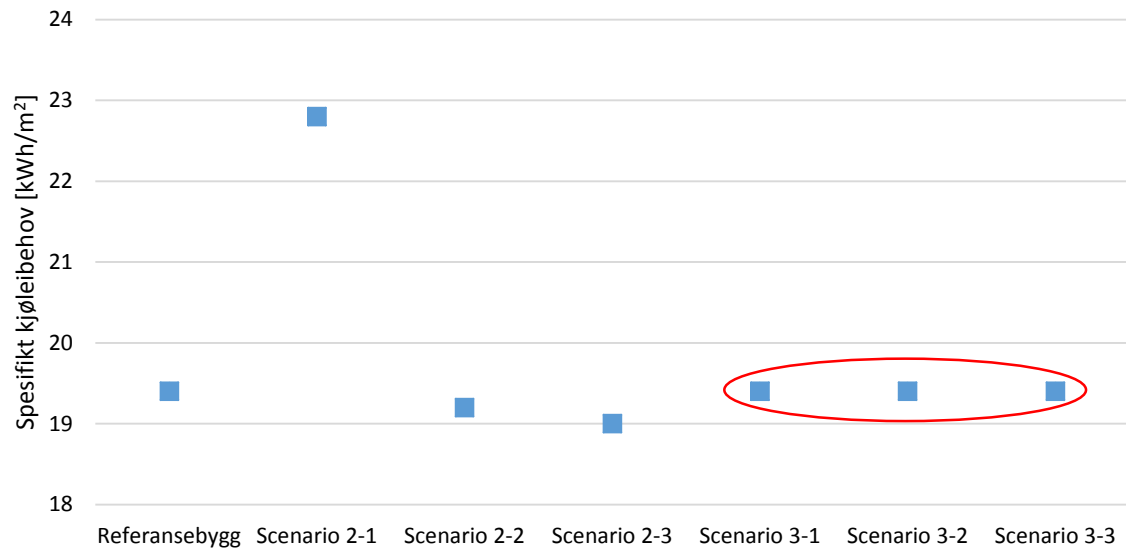
Figur 49 indikerer at det vil være en sammenheng mellom gjennomsnittlig PPD og operativ temperatur, da grafene viser at PPD øker dersom den operative temperaturen blir høyere enn settpunkts temperaturen. Den gjennomsnittlige operative temperaturen er lavest i Scenario 1-2, hvor den i sommermånedene også har best PPD-verdi. Derimot vil samme scenario, i vintermånedene når den operative temperaturen er lav, ha blant de høyeste PPD-verdiene. Scenario 1-2 er også det scenarioet med overordnet best termisk komfort. Dette vises i Tabell 19, hvor 80 % av de okkuperte timene er på et akseptabelt PPD- og PMV-nivå, mens det for referansebygget bare er på 69 %.

Tabell 19: Termisk komfort Scenario 1, Sone 1

Sone 1	Prosentvis tid av okkuperte timer					
	Komfortkategori	Referansebygg	Scenario 1-1	Scenario 1-2	Scenario 1-3	Scenario 1-4
I – Best		53 %	57 %	61 %	60 %	56 %
II – Bra		61 %	66 %	70 %	68 %	64 %
III – Akseptabelt		69 %	75 %	80 %	77 %	72 %
IV - Uakseptabelt		31 %	25 %	20 %	23 %	28 %

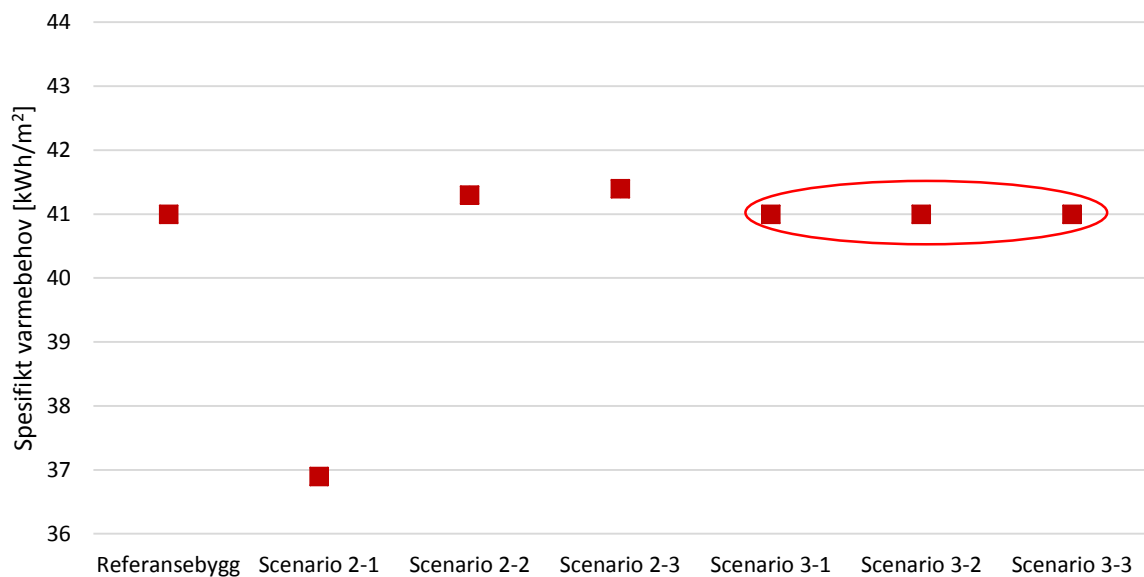
9.2.2 Effekt av endring i dybde og åpningsareal i dobbelfasaden

Dimensjonering av åpningene i den doble fasaden kan være et viktig kriterium for fjerningen av varme fra hulrommet. Om luftstrømmen i hulrommet endres er også interessant å se på, da denne kan komme til å påvirke kjølebehovet i bygget dersom ikke varmen blir transportert bort. Figur 50 viser det spesifikke kjølebehovet for bygget ved Scenario 2 og 3.



Figur 50: Spesifikt kjølebehov for Scenario 2 og 3

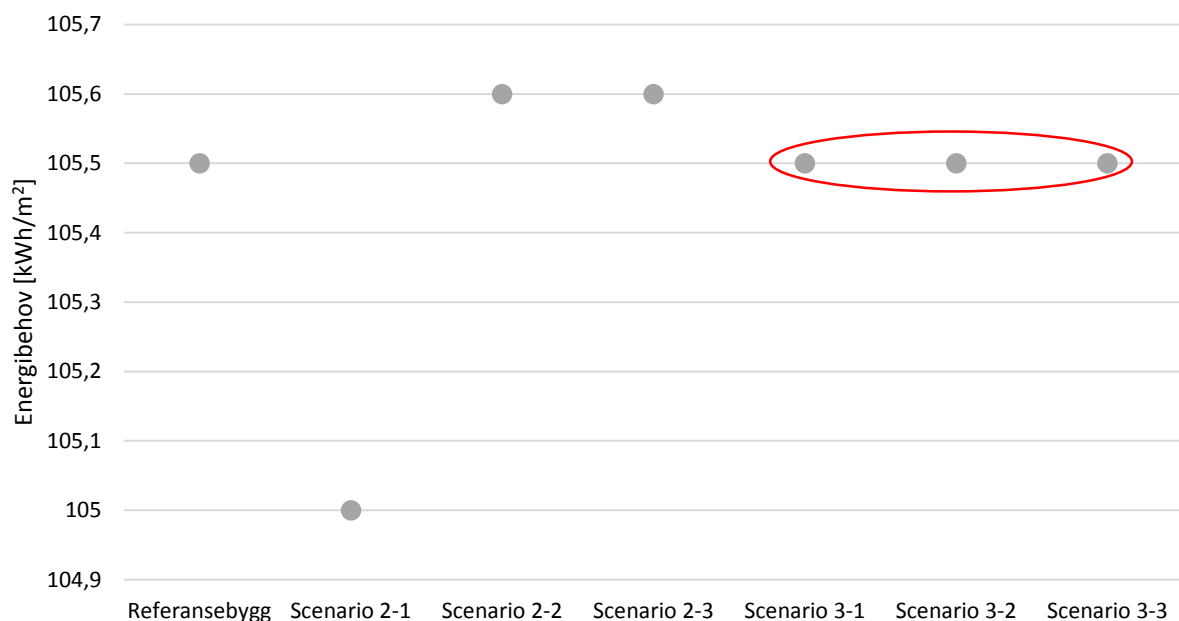
Ved å endre åpningsarealet mellom hulrommet og omgivelsene fra 5 % i referansebygget til 10 % og 15 % med Scenario 2-2 og 2-3 skjer det en reduksjon på henholdsvis 1 % og 2 % i det spesifikke kjølebehovet for bygget. Som figuren viser er det Scenario 2-1, hvor hulrommet er stengt fra omgivelsene som gir det største kjølebehovet. Her vil varmen fra solstrålingen om sommeren bli fanget, da det ikke går noen volumstrøm gjennom hulrommet som kan fjerne denne varmen. Kjølebehovet for Scenario 3 endrer seg ikke fra referansebygget.



Figur 51: Spesifikt varmebehov for Scenario 2 og 3

Figur 51 viser det spesifikke varmebehovet for Scenario 2 og 3. Sammenlignet med kjølebehovet viser figuren at varmebehovet derimot øker med økende åpning mellom hulrommet og omgivelsene. Ved en økning fra 5 % i referansebygget til 10 % og 15 % for henholdsvis Scenario 2-2 og 2-3 blir det en omtrentlig økning i varmebehovet på henholdsvis 0,7 % og 1 %. Dette er en økning som ikke vil være av betydelig størrelse for modellen. Dersom hulrommet er lukket, 0 % av glassfasaden som Scenario 2-1, vil det spesifikke varmebehovet være redusert med 10 % sammenlignet med referansebygget. En slik forbedring vil kunne redusere det totale energibehovet til bygget. Varmebehovet for Scenario 3 endrer seg heller ikke her fra referansebygget.

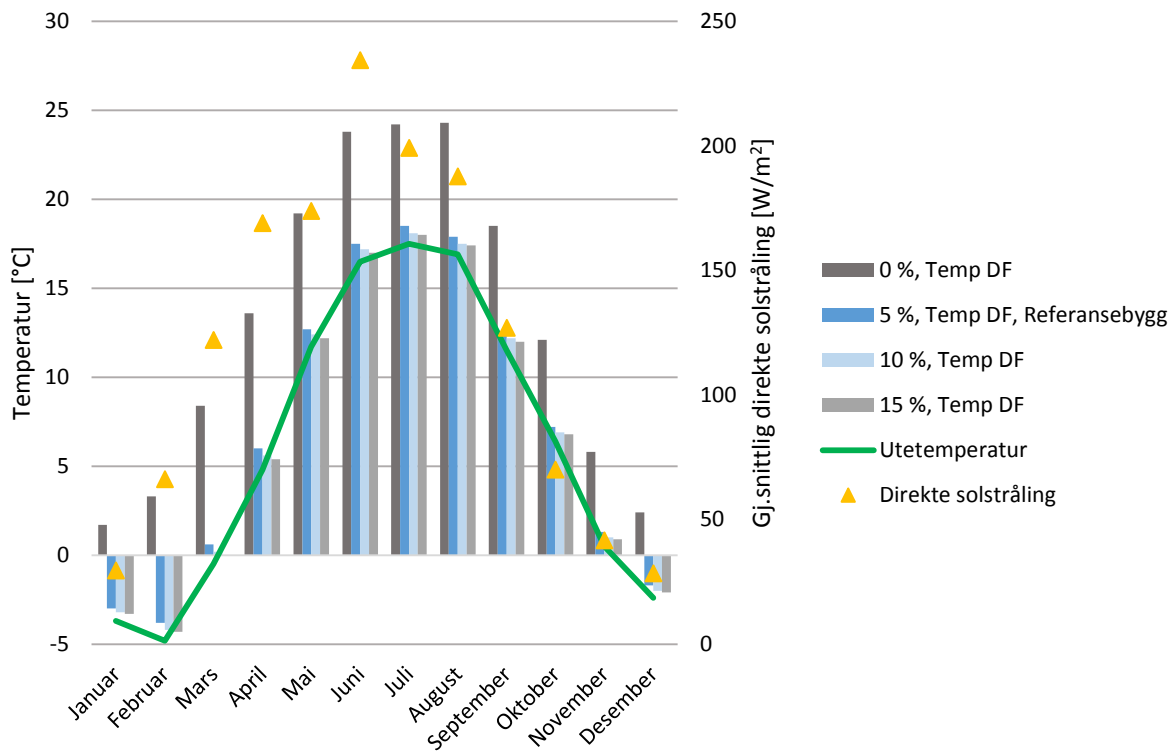
Hvordan det totale energibehovet endres ved implementering av de ulike scenarioene vises i Figur 52.



Figur 52: Totalt energibehov for Scenario 2 og 3

Det vil bare være små endringer for referansebygget i det totale energibehovet ved simulering med ulike åpningsareal, Scenario 2, ved en bestemt dybde på hulrommet. Scenario 2-1 gir en endring på 0,5 kWh/m² per år, som også er den største endringen av Scenario 2 og 3. Den røde ringen på Figur 50, Figur 51 og Figur 52 viser at det vil ikke forekomme noen som helst endring i spesifikt varme-, kjøle- og totalt energibehov for noen av scenarioene i Scenario 3. Derfor er det valgt å anta at dybden på hulrommet ikke vil påvirke verken energibehovet eller den termiske komforten i bygget i noen større grad. Videre er det derfor valgt å fokusere på referansebygget for Scenario 2, med ulikt åpningsareal mellom hulrommet og omgivelsene i den doble fasaden. Det kan det antas at mindre kjølebehov, som for Scenario 2-2 og 2-3, tilsvarer forbedret termisk komfort i sommermånedene siden den operative temperaturen er på et lavere nivå.

Ved å se sammenhengen mellom energibehovet og temperaturen i den doble fasaden i Figur 53, for Scenario 2-1 med lukket hulrom, kan en se at økt temperatur i hulrommet på sommeren vil gi økt kjølebehov i bygget, mens den om vinteren vil gi redusert varmebehov. For åpent hulrom vil altså det totale energibehovet ikke påvirkes spesielt mye av endringer i åpningsstørrelse i IDA ICE.

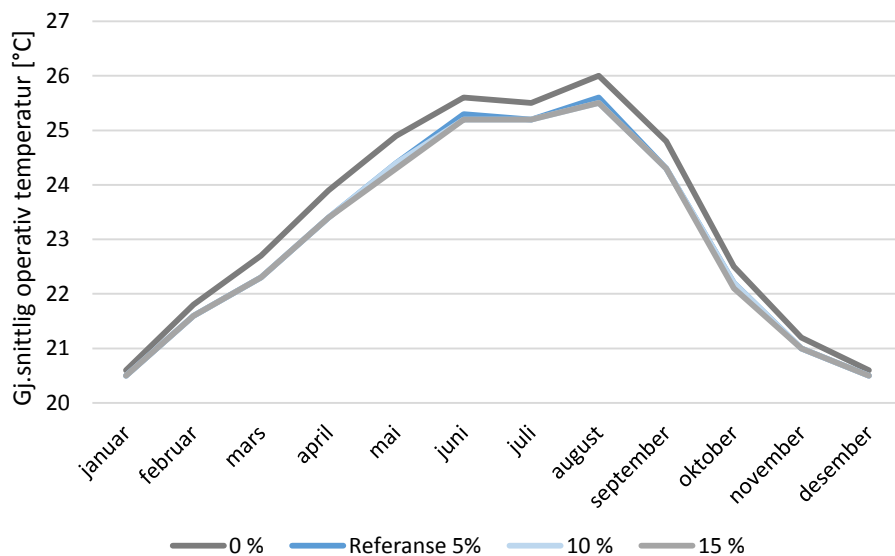


Figur 53: Gjennomsnittlig temperatur i hulrommet i den doble fasaden i Sone 1 og gjennomsnittlig direkte solstråling, hulrommets bredde 0,6 m med varierende åpningsareal

Figur 53 viser den gjennomsnittlige temperaturen per måned i hulrommet i den doble fasaden i Sone 1, hvor den refererer til temperaturen i dobbelfasadens hulrom som «Temp DF». Hulrommets dybde er på 0,6 m og åpningsstørrelsen mellom hulrommet og omgivelsene varierer. Figuren viser at ved åpent hulrom vil ikke temperaturen i dobbelfasadens hulrom endres i like stor grad sammenlignet med lukket hulrom. Temperaturfordelingen har en endring på 10 % i januarmåned for en åpning på 5 % til 15 % av glassfasaden. Selv om endringen ikke er veldig stor vil den likevel være med på å påvirke det spesifikke varmebehovet i bygget slik som Figur 51 viser. For sommermånedene vil temperaturen i den doble fasaden med 5 % åpning være omtrent 9 % høyere sammenlignet med en åpning på 15 %. Dette vil igjen øke kjølebehovet for referansebygget med åpningsareal på 5 % av glassarealet mellom hulrommet og omgivelsene som vist i Figur 50.

Scenario 2-1, 0 %, er altså en lukket statisk buffer. Lukket løsning vil gi økte temperaturer i hulrommet gjennom hele året, som vist i Figur 53. Scenarioet vil ha plussgrader i hulrommet i vintermånedene når det er kaldt ute. Dette gjør at hulrommet kan bli brukt som en termisk buffer. En termisk buffer fungerer som en midlertidig lagringsplass som reduserer varme- og kjølelast ved å ta til seg og slippe ut varme. Dette gjør at en kan se fordelene med å lukke hulrommet på vinterstid da det vil kunne bidra til mindre varmebehov for kontorbygget slik som Figur 51 indikerer. Av den grunn vil det være interessant å se på det totale energibehovet ved en manuell styring, hvor hulrommets åpninger er stengt på vinteren men åpne om sommeren. Dette vil det bli sett nærmere på i *delkapittel 9.4.4 Manuell styring av åpningen mellom omgivelsene og hulrommet*.

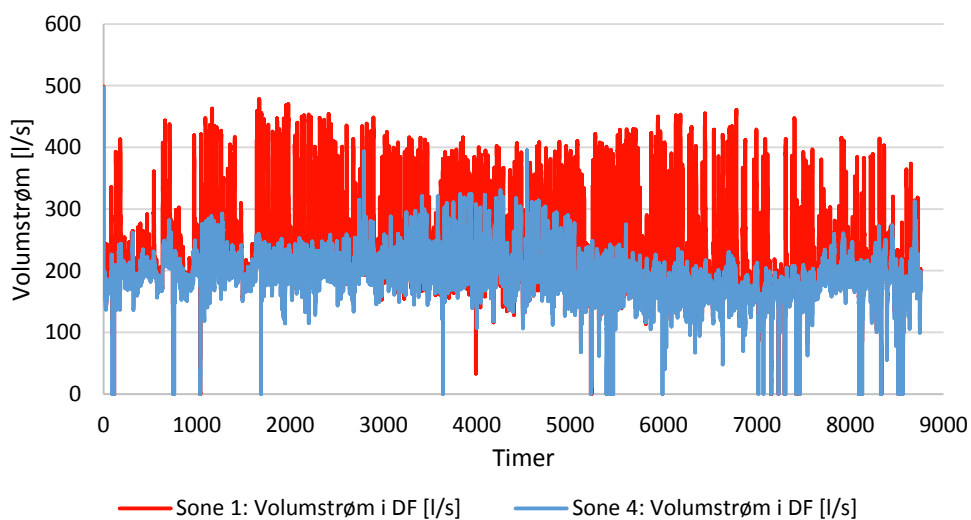
Den gjennomsnittlige operative temperaturen per måned i Sone 1, for ulike åpningsareal, vises i Figur 54.



Figur 54: Gjennomsnittlig operativ temperatur i Sone 1, ved hulrommets bredde på 0,6 m og varierende åpningsareal

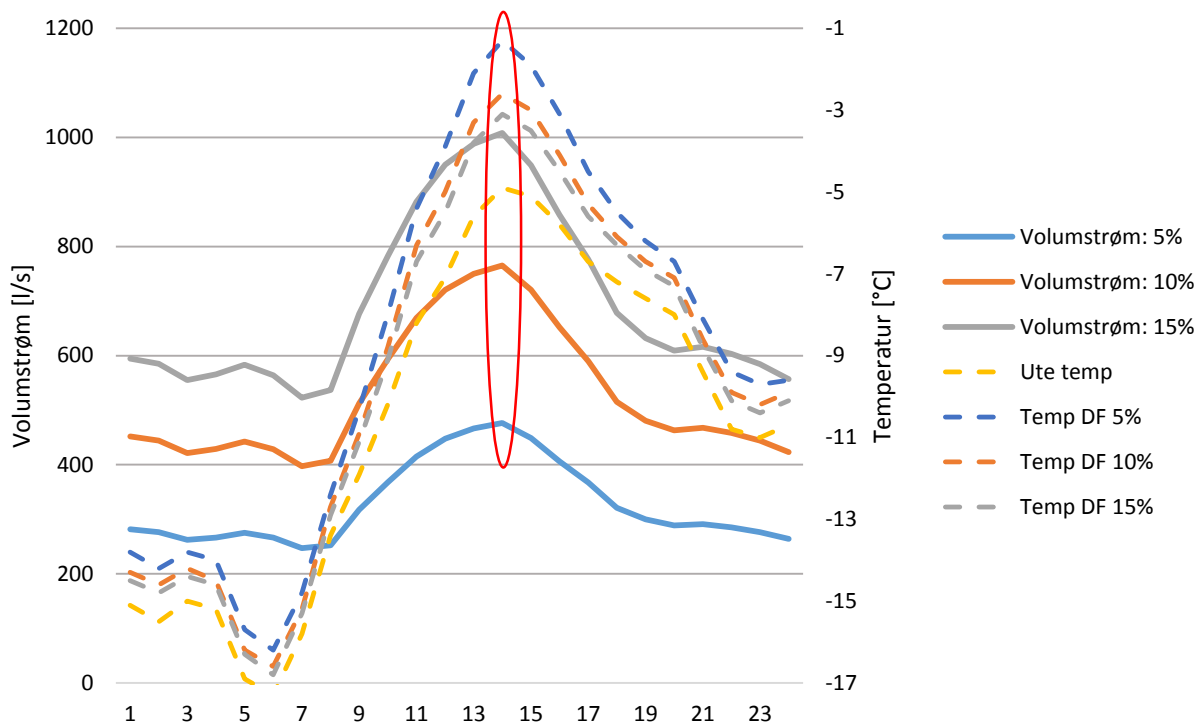
Som figuren illustrerer vil 0 %, lukket hulrom, gi en økning i den operative temperaturen gjennom hele året. For det åpne hulrommet, vil åpningsstørrelsen på 5 % ha litt høyere temperatur i Sone 1 enn for en simulering med åpning på 10 % og 15 % av glassarealet. Dersom dette sees i sammenheng med den gjennomsnittlige temperaturen i hulrommet i Figur 53, indikerer resultatet at høyere temperatur i hulrommet gir høyere temperatur i sonene.

Det vil være interessant å se om volumstrømmen gjennom den doble fasaden endrer seg med forskjellig åpningsareal mellom hulrommet og omgivelsene. Ved feildimensjonering av dybde og åpninger kan det føre til at varmen i hulrommet ikke vil transporteres bort. Det er ønskelig med en volumstrøm i hulrommet som kan transportere fuktig og varm luft ut av hulrommet slik at det ikke oppstår kondens eller overopphetning. Siden drivtrykket øker med økende temperaturforskjell er det interessant å se om det er forskjell i volumstrømmen i hulrommet på nord- og sørfasaden i bygget. Volumstrømmen gjennom året i den doble fasaden for Sone 1 mot sør og Sone 4 mot nord, for referansebygget, vises i Figur 55.



Figur 55: Volumstrøm i den doble fasaden i Sone 1 mot sør, og Sone 4 mot nord

Som Figur 55 viser er det forskjell på hvor stor volumstrømmen i hulrommet vil være dersom fasaden er vendt mot sør i forhold til den som er vendt mot nord. Det er derfor valgt å se nærmere på fasaden som er vendt mot sør da det oppstår høyest luftgjennomstrømning her. Illustrert i Figur 55 vil dagen med høyeste volumstrømmen gjennom den doble fasaden være 11/3-2015, i fasaden mot sør. Det er valgt å gjøre en kontrollberegning for denne dagen, for å sammenligne egen beregning med resultatet fra IDA ICE. Som resultat i IDA ICE er den høyeste volumstrømmen denne dagen omtrent 476 l/s for referansebygget, som har en åpning på 5 % av glassarealet.



Figur 56: Volumstrømmen og temperatur i hulrommet ved bredde 0,6 m og ulik åpningsareal samt utetemp. (11/3-2015)

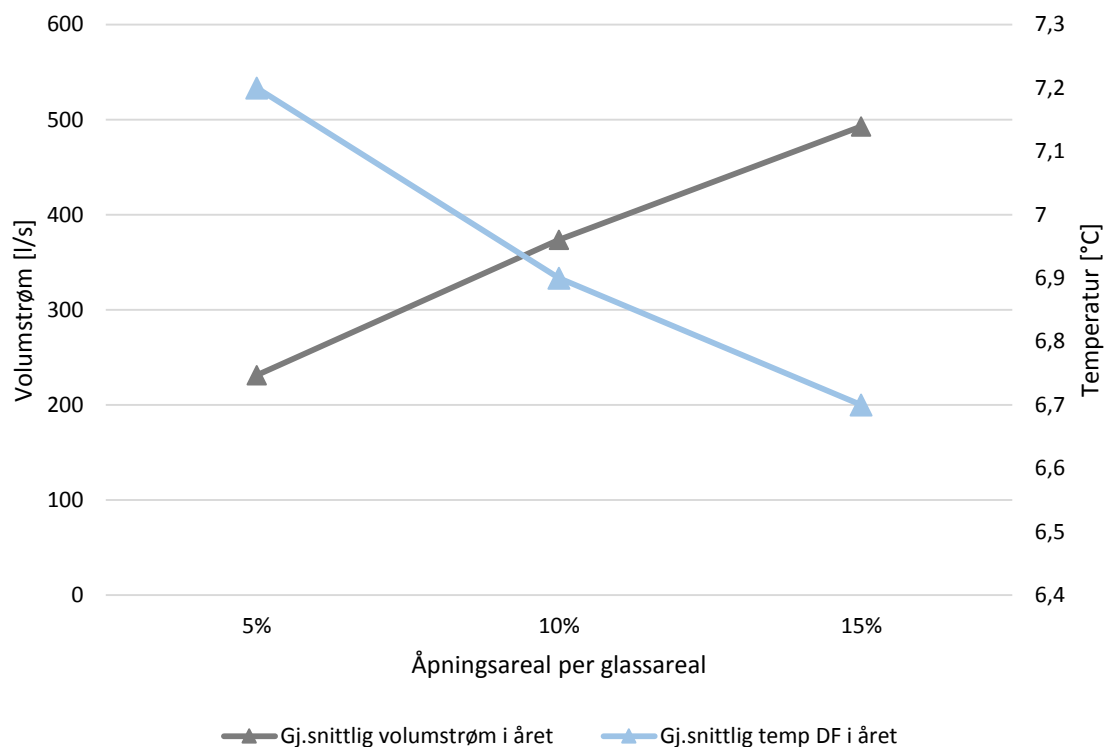
Som Figur 56 viser, vil volumstrømmen med fast dybde på hulrommet variere etter hvor stor åpningen mellom hulrommet og omgivelsene i den doble fasaden er. Med en økning fra 5 % til 15 % av glassarealet vil volumstrømmen gjennom den doble fasaden på det meste øke med omtrent 50 %. Figuren viser også temperaturen i hulrommet med forskjellig åpningsstørrelse samt utetemperaturen denne dagen.

Tabell 20 viser den beregnede volumstrømmen mot resultatet i IDA ICE, for dagen med høyest volumstrøm gjennom dobbelfasaden. Den røde ringen i Figur 56 er brukt som utgangspunkt for valg av temperaturer og sammenligning med volumstrømmen fra resultatet i IDA ICE. IDA ICE bruker en $C_d=1$, da de forutsetter at det er en lekkasje eller en åpning med trykkforskjell som gir en jevn hastighetsfordeling over åpningen til hulrommet. Dermed er det også valgt å bruke denne faktoren i den beregnede volumstrømmen. Kontrollregning av volumstrømmen er gjort og vises i VEDLEGG E. Beregnet volumstrøm i hulrommet. Ved en forenklet beregning er det valgt å bruke Ligning 6, 7 og 8 fra delkapittelet 4.2.2 Ventilasjonsprinsipper for hulrommet i dobbelfasader.

Tabell 20: Beregnet volumstrøm mot resultatet i IDA ICE

Åpningsstørrelse	Beregnet volumstrøm [l/s]	Volumstrøm i IDA ICE [l/s]
5 %	460	476
10 %	738	765
15%	980	1008

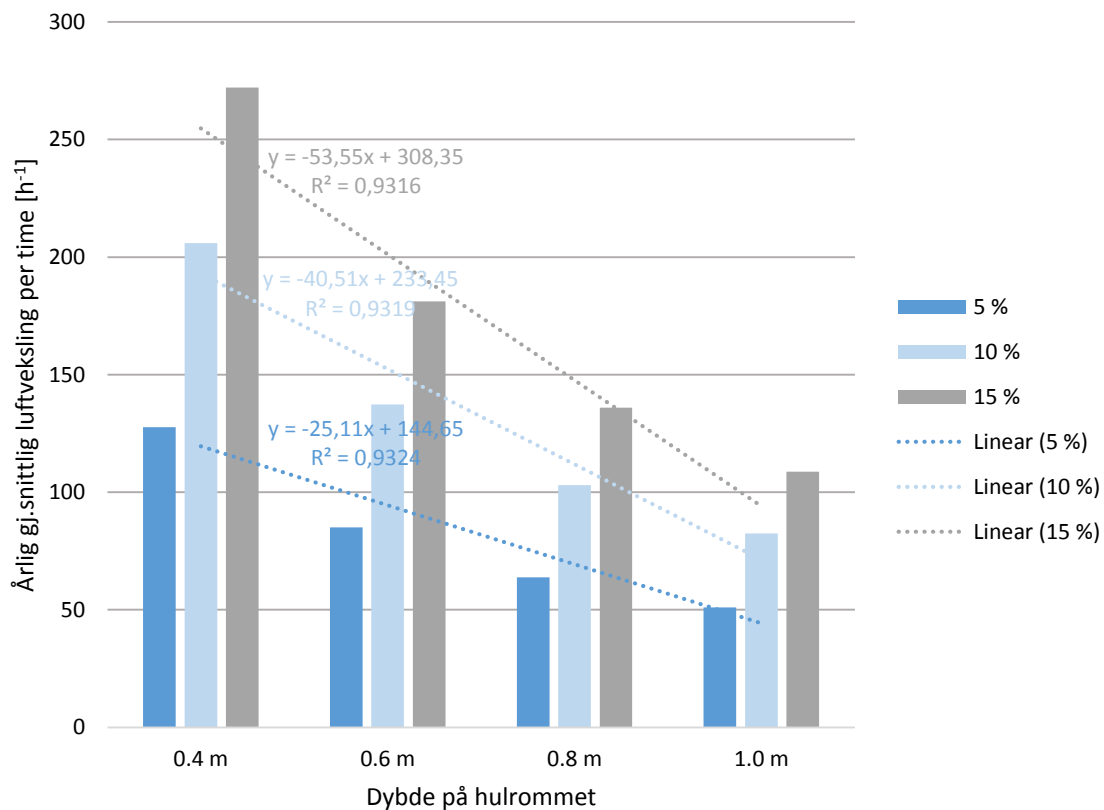
Tabell 20 illustrerer en omtrentlig forskjell på 5 % i beregnet resultat mot simuleringsresultatene. En av årsakene til ulik volumstrøm kan være at det ikke er tatt hensyn til vinden i kontrollberegningen, mens det i IDA ICE er tatt hensyn til denne faktoren. Ved å ha med faktoren for vind vil volumstrømmen i hulrommet øke og dermed vil resultatet fra IDA ICE ha en større volumstrøm enn de beregnede resultatene, slik Tabell 20 viser. For å se hvordan temperatur og volumstrøm i hulrommet endrer seg med åpningsarealet, er det valgt å se nærmere på de gjennomsnittlige verdiene over året. Figur 57 viser gjennomsnittlig volumstrøm og temperatur i hulrommet mot sør for ett år.



Figur 57: Gjennomsnittlig volumstrøm og temperatur per år i hulrommet

I følge Torres et al. (2007) vil størrelsen på åpningene mellom omgivelsene og hulrommet i den doble fasaden påvirke luftgjennomstrømningen i hulrommet, ved at større åpninger vil trekke ut den varme luften av hulrommet siden det oppstår høyere luftstrømninger her. Dette gjelder også for denne simuleringen da den gjennomsnittlige volumstrømmen per år øker med åpningsarealet mens den gjennomsnittlige temperaturen i hulrommet per år reduseres med økende volumstrøm, slik som vist i Figur 57. Ved å se sammenhengen mellom varmebehovet i Figur 50, kjølebehovet i Figur 51 og volumstrømmen og temperatur i dobbelfasaden i Figur 57, er det tydelig at disse faktorene avhenger av størrelsen på åpningen mellom hulrommet og omgivelsene. Det vises her at økende åpning gir lavere temperatur i hulrommet, og en av grunnene til dette kan være den økende volumstrømmen som klarer å transportere bort varmen. Derimot øker varmebehovet i bygget om vinteren ved økende areal på åpningene. Det kan antas at den isolerende effekten ved stor åpning vil være mindre enn for en mindre åpning. Bakgrunnen for denne antakelsen er at en mindre åpning vil holde lengre på luften i hulrommet sammenlignet med en større. Dermed vil luften varmes opp bedre i hulrommet og noe av denne varmen vil transporteres inn til sonene bak dobbelfasaden. Dette vises i

Figur 58, hvor den gjennomsnittlige luftvekslingen i hulrommet per år er høyest ved den største åpningen på 15 % av glassarealet.



Figur 58: Gjennomsnittlig luftveksling per time per år i dobbelfasaden mot sør ved ulik dybde og åpningsareal

Figuren viser at den gjennomsnittlige luftvekslingen i hulrommet vil variere med både dybden på hulrommet og åpningsarealet. Desto smalere dybde dess høyere blir luftvekslingen i hulrommet, og det samme gjelder for åpningsarealet. Likningen på de lineære linjene indikerer et verktøy for å beregne den årlige gjennomsnittlige luftvekslingen i hulrommet i forhold til dybden.

Tabell 21 viser den termiske komforten i Sone 1 for Scenario 2 og 3.

Tabell 21: Termisk komfort for Scenario 2 og Scenario 3

Sone 1 Komfortkategori	Prosentvis tid av okkuperte timer						
	Referanse bygg	Scenario 2-1	Scenario 2-2	Scenario 2-3	Scenario 3-1	Scenario 3-2	Scenario 3-3
I – Best	53 %	51 %	53 %	53 %	53 %	53 %	53 %
II – Bra	61 %	58 %	61 %	61 %	61 %	61 %	61 %
III – Akseptabelt	69 %	66 %	69 %	69 %	69 %	69 %	69 %
IV - Uakseptabelt	31 %	34 %	31 %	31 %	31 %	31 %	31 %

Tabellen indikerer at det eneste scenarioet som blir påvirket med hensyn til den termiske komforten i Sone 1 er Scenario 2-1, hvor åpningen er 0 % av glassfasaden. Det kan dermed antas at den termiske komforten i kontorbygget ikke vil bli direkte påvirket av størrelsen på åpningen mellom hulrommet og omgivelsene eller dybden på hulrommet så lenge disse endres på innenfor rimelighetens grenser.

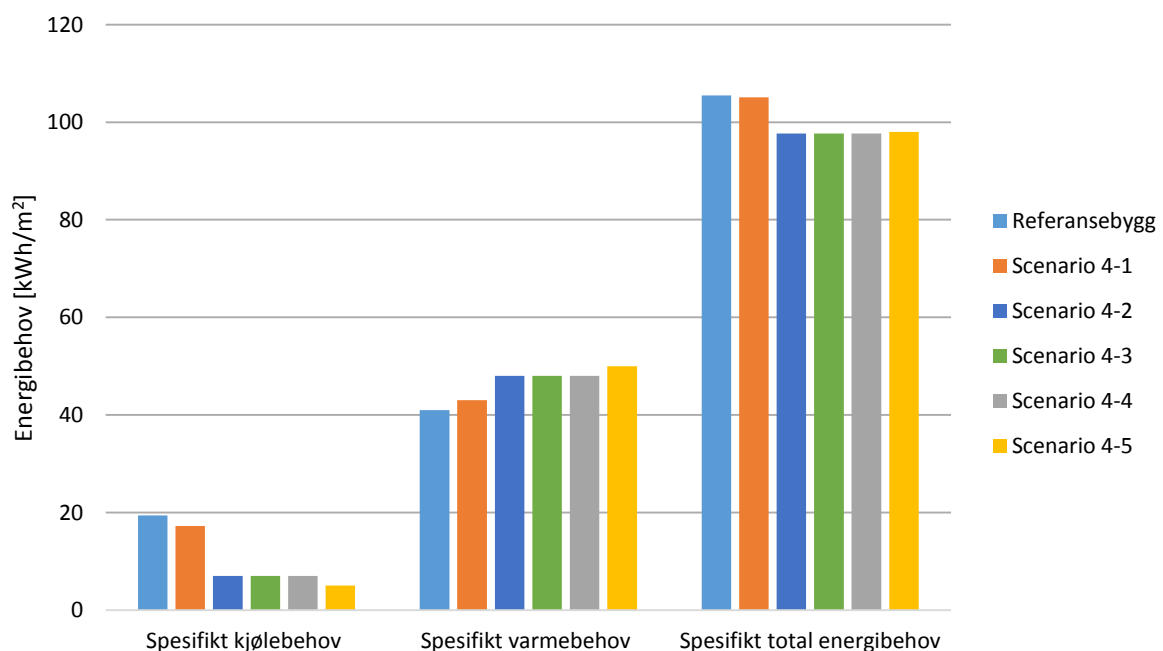
9.2.3 Installering og plassering av solavskjermingssystem

Dette delkapittelet ser på effekten på termisk komfort og energibruk i bygg ved bruk av solavskjerming. Det skal her sees på effekten av plasseringen av solavskjermingssystemet, hvilken plassering som reduserer energiforbruket og hvilken plassering som gir best termisk komfort. Det er valgt å se nærmere på plasseringen av solavskjermingssystemet på innsiden, i midten og på utsiden av den doble fasaden. I IDA ICE er det viktig at plasseringen av solavskjermingssystemet blir gjort riktig. Dersom solavskjermingen skal plasseres i hulrommet skal den normalt ikke spesifiseres utenfor den innerste ruten, men heller som en intern avskjerming av den ytterste glassfasaden (EQUA Simulation AB, 2013b). Det er også slik implementeringen av solavskjermingssystemet er utført i denne oppgaven. Solavskjermingen vil være persiennner, som vil ha en «off-white» farge med horisontale lameller med bredde 24 mm. Tabell 22 viser de ulike plasseringene av solavskjermingssystemet som det skal simuleres med.

Tabell 22: Scenario 4, plassering av solavskjermingssystemet

Scenario 4: Solavskjerming	
Scenario 4-1	Solavskjerming på innsiden
Scenario 4-2	Solavskjerming i hulrommet: 1/3 mot vindu
Scenario 4-3	Solavskjerming i hulrommet: Midten
Scenario 4-4	Solavskjerming i hulrommet: 1/3 mot glassfasade
Scenario 4-5	Solavskjerming på utsiden

Som tabellen viser vil det altså bli gjort fem ulike plasseringer av solavskjermingssystemet for den doble fasaden, hvor tre av dem er i hulrommet. Grunnen til ulik plassering i hulrommet er for å se om en plassering mot vindu eller mot glassfasade vil kunne spille en rolle for energibehovet og innklimaet i kontorbygget. Ved implementering er solavskjermingen automatisert og vil styres etter solinnstråling. Når nivået på solinnstrålingen når 100 W/m^2 går persiennene ned. Figur 59 viser det spesifikke energibehovet for referansebygget sammenlignet med de ulike installeringene av solavskjermingssystemet i Scenario 4.

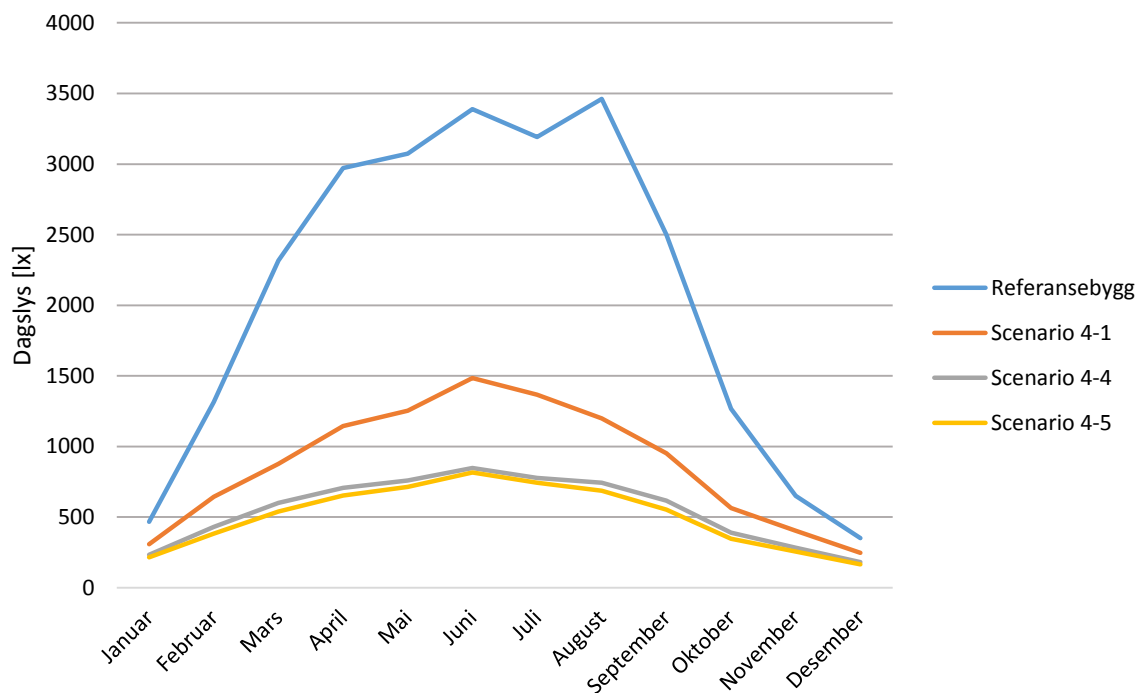


Figur 59: Spesifikt energibehov, Scenario 4, plassering av solavskjermingssystem

Som figuren illustrerer reduseres det spesifikke kjølebehovet i bygningen ved bruk av solavskjermingssystem. Kjølebehovet reduseres med 12,4 kWh/m² og 14,4 kWh/m² ved henholdsvis mellomliggende og utvendig plassering av solskjermingen. Det spesifikke varmebehovet i bygget vil øke for alle scenarioene i Scenario 4, da det antas at mye av varmen fra solinnstrålingen stenges ute av kontoret på vinterstid på grunn av solavskjermingen. Utvendig solavskjerming øker varmebehovet mest av scenarioene, og vil øke varmebehovet med 9 kWh/m². Årsaken til det økte varmebehovet vil altså være på grunn av varmen som stenges ute fra bygget på vinterstid, og som dermed ikke vil kunne bidra som et positivt bidrag til energibehovet.

Når solavskjermingssystemet skal plasseres i midten av hulrommet gir ikke selve plasseringen her noen betydelige utslag. Posisjonen i hulrommet for solavskjermingsanlegget har liten betydning for energibruken eller termisk komfort i løpet av året. Det er altså lite som skiller scenariene med posisjonering av solavskjerming i hulrommet. Plasseringen kan ha betydning for luftstrømningen i hulrommet, men det er ikke valgt å gå nærmere inn på dette her. Det velges derfor bare å se på scenario 4-4 hvor solavskjermingen ligger 1/3 del mot glassfasaden, da dette ifølge Poirazis (2004) vil være den beste plasseringen. Denne plasseringen vil bli sammenlignet med solavskjerming på innsiden og på utsiden av den doble fasaden.

I *delkapittel 4.4.4 Aktinisk miljø* ble det poengtert av solavskjermingen vil redusere dagslysnivået i sonene. Dette vises også i Figur 60 hvor dagslysnivået ved første kontorpult i Sone 1, vil ha en betydelig reduksjon ved implementering av solavskjermingssystemet.



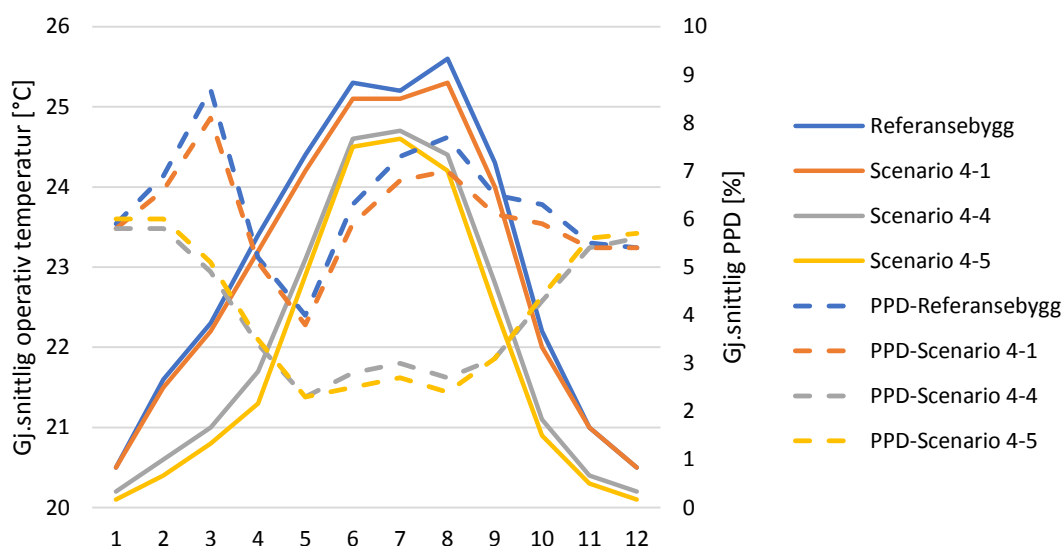
Figur 60: Dagslys i Sone 1 ved første kontorpult for Scenario 4

Det vises tydelig av figuren at dagslysnivået i sonene vil være påvirket av både implementering og plasseringen av solavskjermingssystemet. Teknisk forskrift setter kravene til lys i § 13.12, hvor det er beskrevet at det er nødvendig å ha tilfredsstillende tilgang på lys og dagslys uten sjenerende varmebelastning. Ved å se på sommermånedene vil det Scenario 4-4 og 4-5 ha redusert dagslysnivået med 76 % sammenlignet med modellen uten solavskjermingssystem. Til gjengjeld reduseres også kjølebehovet ved å bruke solskjerming da mye varme fra solstråling vil kunne holdes ute, slik som

Figur 59 illustrerer. Innvendig solavskjerming reduserer ikke dagslysnivået i sonen like mye som mellomliggende og utvendig solavskjerming. Årsaken til dette kan være at mye dagslys trenger inn i sonene selv med solavskjerming. Selv på vinterstid reduseres dagslysnivået med omtrent 50 %, og dette kan gjøre at innemiljøet i sonene blir redusert.

Inneklima

Figur 61 viser sammenhengen mellom månedlig gjennomsnittlig PPD og gjennomsnittlig operativ temperatur.



Figur 61: Månedlig gjennomsnittlig operativ temperatur og PPD for Scenario 4, Sone 1

Den gjennomsnittlige operative temperaturen er lavest i Scenario 4-5, hvor den i sommermånedene har best PPD-verdi. Ved Scenario 4-1, innvendig solavskjerming, reduseres nesten ikke den gjennomsnittlige operative temperaturen sammenlignet med referansebygget som ikke har solavskjerming.

Sittegruppene som er plassert ved store vindusarealer er særlig utsatt for direkte solstråling og uten solavskjerming, som referansebygget, vil det oppfattes ubehagelig å sitte lenge i sterk sol. Dette vises i Tabell 23 hvor referansebygget har en uakseptabelt PPD- og PMV-nivå på hele 31 %, mens det har redusert til bare 1 % ved utvendig solavskjerming.

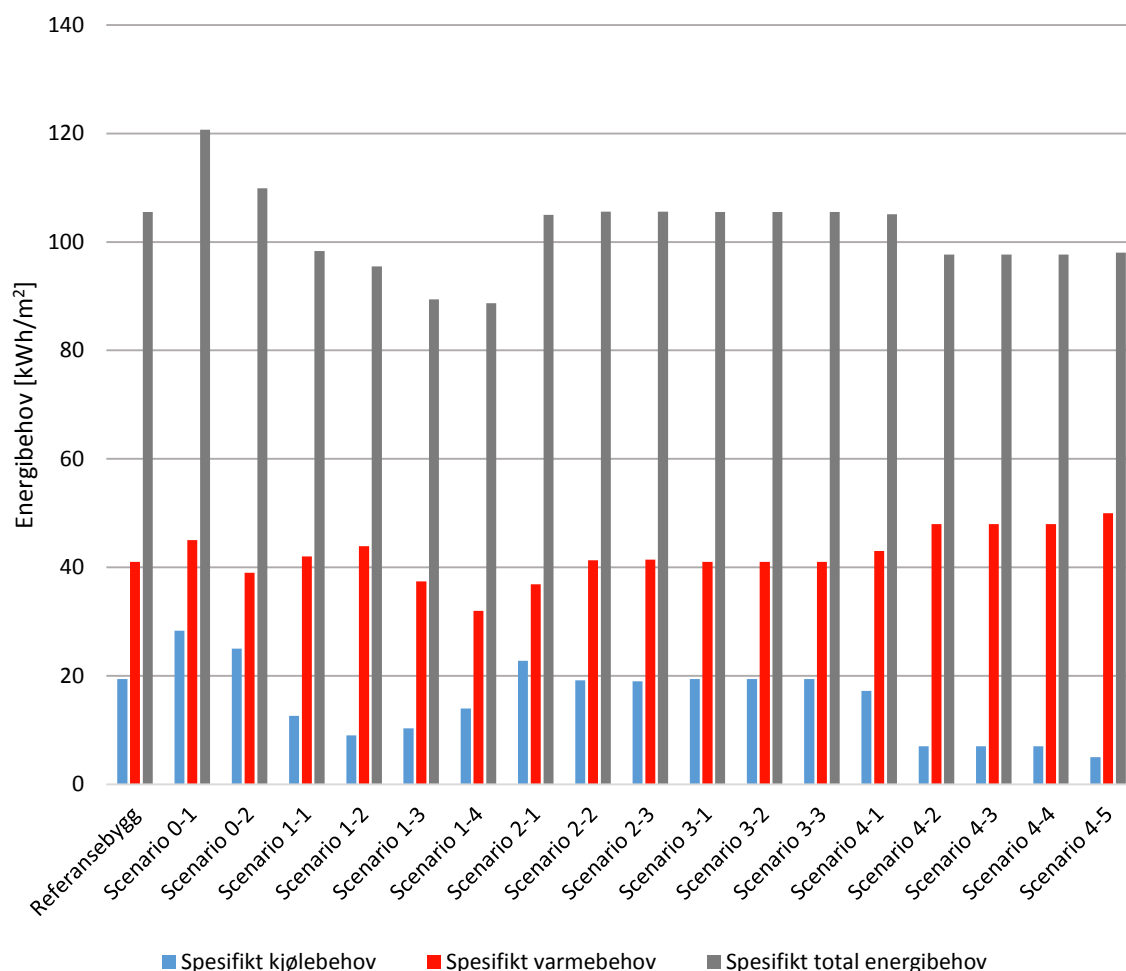
Tabell 23: Termisk komfort Scenario 4, Sone 1

Sone 1	Prosentvis tid av okkuperte timer				
	Komfortkategori	Referansebygg	Scenario 4-1	Scenario 4-4	Scenario 4-5
I – Best		53 %	54 %	72 %	81 %
II – Bra		61 %	62 %	82 %	92 %
III – Akseptabelt		69 %	71 %	92 %	99 %
IV - Uakseptabelt		31 %	29 %	8 %	1 %

Solavskjermingssystemet påvirker altså dagslys, termisk komfort og energi. Hovedfunksjonene til solavskjermingssystemet skal altså være å kontrollere lufttemperatur, skjerme mot direkte soldisponering, regulere operativ temperatur, hindre blinding og redusere sol som skaper kjølebehov i bygget. Resultatene her viser at det vil være nødvendig å implementere solavskjermingssystem i bygget for å forbedre inneklimate og redusere energibehovet.

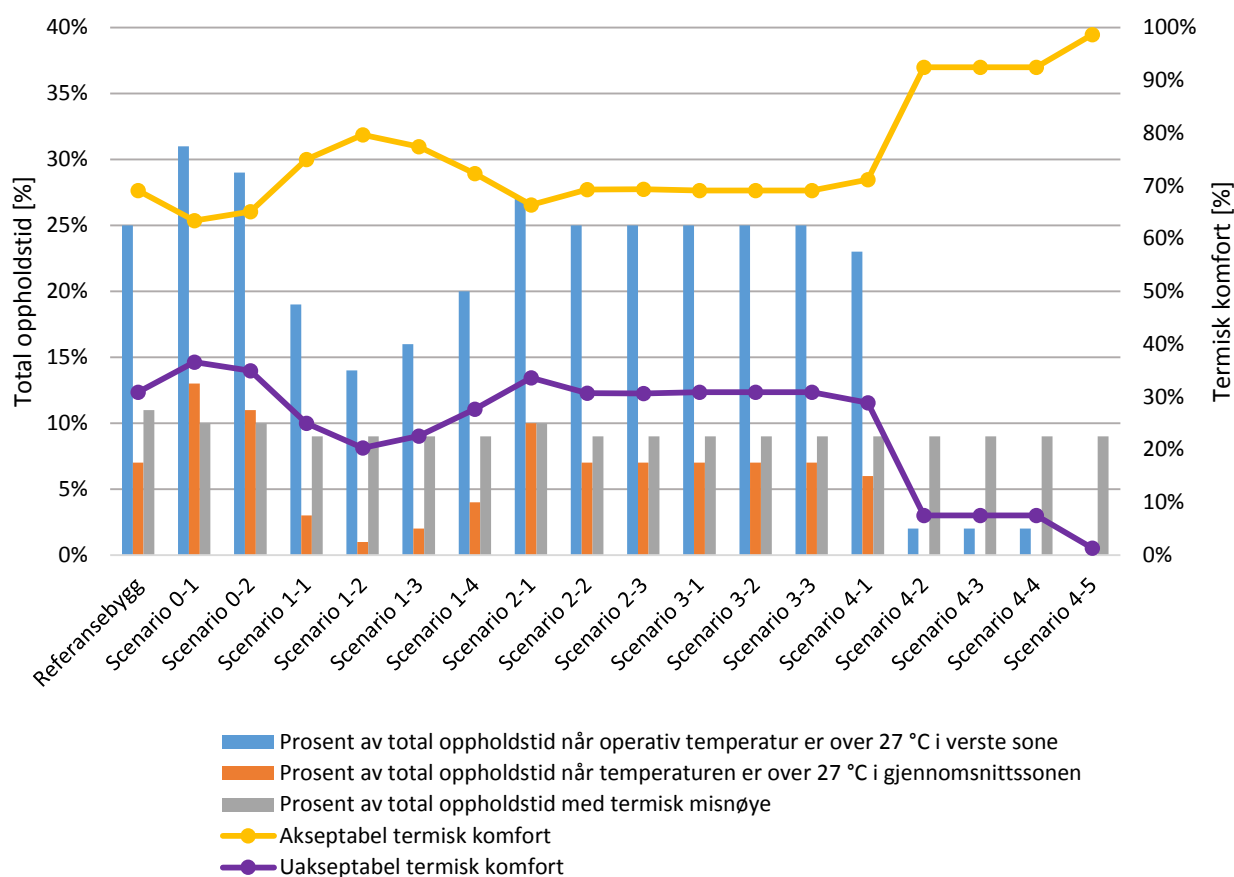
9.3 Sammendrag av analysen med referansebygget

Det vil i dette delkapittelet komme en kort sammendrag av energibruk og inneklima for de ulike scenarioene. Her vil man få en overordnet oversikt som gjør det lettere å se hvilke tiltak som vil gi den beste løsningen på dobbelfasaden av de ulike simuleringene som er gjort så langt i oppgaven. Oversikt over spesifikk energibruk for de ulike scenarioene vises i Figur 62.



Figur 62: Oversikt over spesifikt energibruk for de ulike scenarioene

Oversikten over spesifikt energibruk for de ulike scenarioene viser at Scenario 1-4, med U-verdi på $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, vil være det scenarionet med lavest energibruk på $88,7 \text{ kWh/m}^2$. Som nevnt i *delkapittel 2.1.2 Passivhus*, skal netto energibehov for romoppvarming være $20 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ for et kontorbygg som følger passivhusstandarden med beliggenhet i Oslo og som er over 1000 m^2 . Ingen av de utvalgte scenarioene oppfyller kravet til varmebehovet. Det scenarionet som kommer nærmest dette kravet er Scenario 1-4 med spesifikt varmebehov på $32 \text{ kWh/m}^2\text{år}$. Selv med lavest totalt energibehov og varmebehov viser figuren at dette scenarionet har ganske stort kjølebehov. Dermed er det store muligheter for å forbedre det totale energibehovet for dette scenarionet. Ved å sammenligne kjølebehovet for de ulike scenarioene, kan en se at det er nødvendig å implementere et solavskjermingssystem i bygget da Scenario 4 har lavest kjølebehov av alle scenarioene sett bort fra scenario 4-1 med innvendig plassering av solavskjermingssystemet.



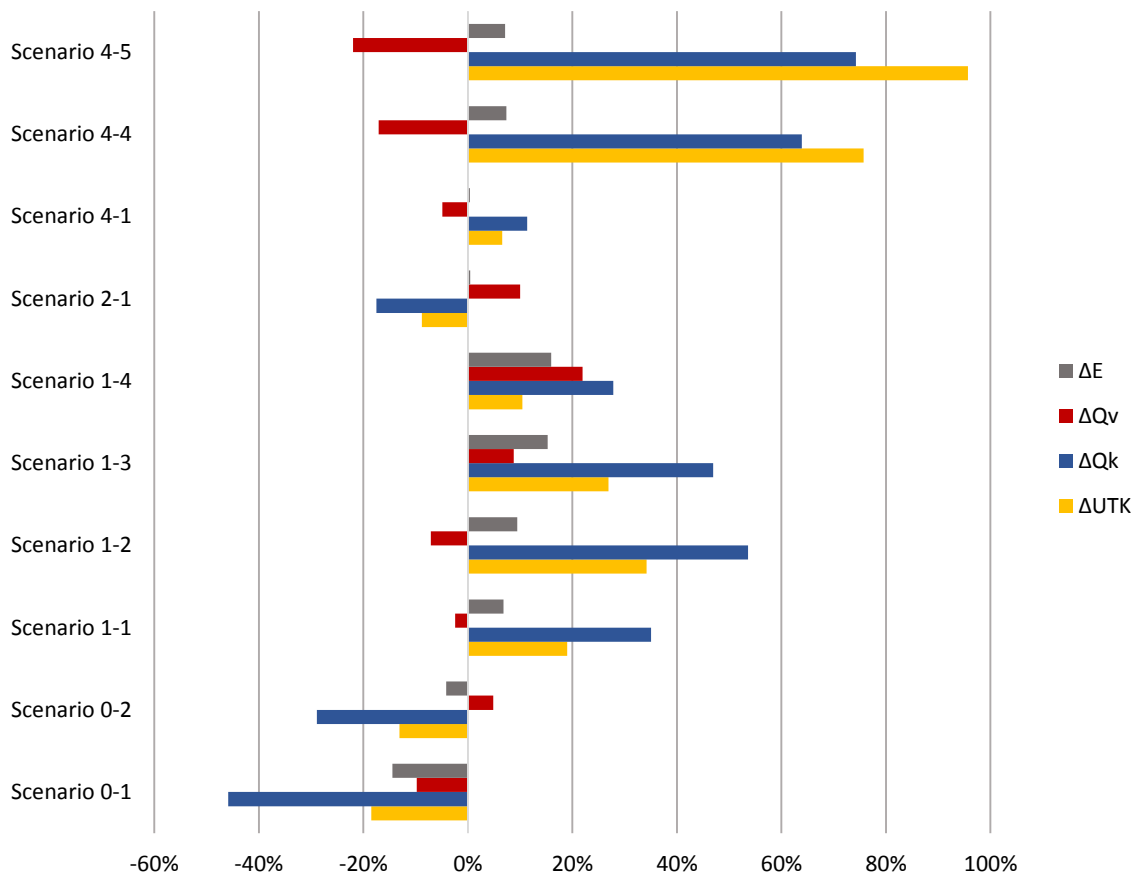
Figur 63: Termisk komfort i under oppholdstid for de ulike scenarioene

Som vi kan anta ut fra Figur 62 og Figur 63, så vil posisjonen på solavskjermingssystemet i hulrommet ha liten betydning for energibruken og den termiske komforten i bygget i løpet av et år. Scenario 4-5, med solavskjerming på utsiden, gir den beste termiske komforten i Sone 1. Her vil det bare vil være 1 % av okkupert oppholdstid som vil være uakseptabel, i tillegg vil dette scenarioet ikke ha noen timer av total oppholdstid med en operativ temperatur over 27 °C. Scenario 2-1, med solavskjerming på innsiden vil ikke være tilfredsstillende for kontorbygget, da hele 27 % av total oppholdstid vil være over 27 °C i verste sone.

Endringene i den doble fasaden som gav størst effekt på energibehov og termisk komfort i kontorbygget er oppsummert og presentert i Figur 64. Her er endringene i energibehov og termisk inneklimate mellom referansebygget og scenarioene representert i %. Energitilførsel ΔE , varmebehov, ΔQ_v , kjølebehov, ΔQ_k og antall timer med uakseptabel termisk komfort, ΔUTK er forkortelsene uttrykt i figuren. Endringene i energibehovet blir presentert med grå søyler, varmebehovet med røde søyler, kjølebehovet i blå søyler og endringene i antall timer med uakseptabel termisk komfort blir presentert med gule søyler. Intensjonen med figuren er å belyse de parameterne som har størst innvirkning på energibehovet og inneklimate for bygget, og dermed gi en indikasjon på hvilke parametere som det er viktig å se nærmere på for å forbedre den doble fasaden.

Figur 64 viser at de scenarioene som gav størst endring fra referansemodellen var Scenario 0, enkelfasade med ulik U-verd, Scenario 1, ulik oppbyggingen i U-verdi og glass i den doble fasaden, Scenario 2-1, lukket hulrom fra omgivelsene og Scenario 4, ulik plasseringen av solavskjermingssystemet. Utdypende beskrivelse av scenarioene vises i Figur 24: Scenarioer for referansebygget. Innledningsvis i litteraturen ble det nevnt at noen av de mest kritiske parameterne i

en dobbelfasaden var: kvaliteten på glassene i fasadene, størrelsen på åpningene i øvre og nedre delen av den doble fasaden, dybden på hulrommet og plassering og materialet av solavskjermingssystemet. Figur 64 viser at disse også var kritiske parameterne for dette bygget. Eneste scenarioet som ikke hadde innvirkning på verken energibehovet eller den termiske komforten i modellen var dybden på hulrommet.



Figur 64: Scenarioene som gav størst endring i energibruk og termisk komfort

Figur 64 viser tydelig at en del parametere i den doble fasaden, fra referansebygget, kan endres for å forbedre energibehovet samt den termiske komforten. De negative prosenttegnene viser at enkelte endringer gav et høyere energibehov eller dårligere termisk komfort enn referansebygget, mens de positive prosenttegnene viser en forbedring. Påvirkningen på energibruken og inneklimate ved å bruke en dobbelfasade vil altså være avhengig av utformingen og hvilke valg som er gjort i den doble fasaden. Det er klart fra figuren at bruk av solavskjerming i hulrommet og på utsiden av den doble fasaden gir lavest kjølebehov med en reduksjon på henholdsvis 64 % og 75 % sammenlignet med referansebygget. En reduksjon som også viser seg å forbedre den termiske komforten i sonene betydelig. Sammenlignet med referansebygget som ikke har implementert solavskjerming så vil forbedringen i antall timer med uakseptabel termisk komfort være redusert med henholdsvis 75 % og 95 %. Dette viser klart at implementering av solavskjerming og plasseringen av denne vil være et kritisk parameter for doble fasader.

Endringen som forårsaker den største endringen i totalt energibehov er Scenario 1, som fokuserte på endring i U-verdi og antall glass i den doble fasaden. Her gav scenario 1-4 en reduksjon i det totale energibehovet på 16 %. Den største delen av energisparingen for scenarioet vil ligge i reduseringen i varmebehovet, som er på hele 22 % sammenlignet med referansebygget.

9.4 Parameteranalyse med forbedret dobbelfasade

Det er ønsket å utføre en ytterligere analyse av noen utvalgte parametere i IDA ICE for et kontorbygg med en forbedret dobbelfasade. Dette er for å vurdere energibruken og inneklimateets følsomhet overfor de tiltakene som er mulig å implementere ved bruk av dobbelfasade, samt se hvordan den forbedrede dobbelfasaden vil bli påvirket av ulike endringer. Hensikten med analysen er å finne ut om en slik parameterendring kan optimalisere designet for den doble fasaden i bygget og dermed finne ut hvilke parametere som vil gi størst utslag på energibehov og inneklimate når den doble fasaden er forbedret.

I første avsnitt vil det bli sett på den forbedrede løsningen av dobbelfasaden slik som det ble gjort med referansebygget. Det ble sett på resultatene av simuleringene, fra referansebygget, for å finne den beste løsningen på den doble fasaden med hensyn på energibruk og inneklimate. Den forbedrede løsningen har altså tatt utgangspunkt i Figur 64. Det vil bli sett på hvordan effekten av å legge inn de beste løsningene i modellen for de ulike scenarioene, muligens kan føre til forbedret inneklimate og redusert energibruk i bygget. Modellen for den forbedrede løsningen på dobbelfasaden vil bli referert til som «Beste løsning» i figurene. Det antas at oppbyggingen til dobbelfasaden for denne modellen vil være den beste løsningen av de simulerte scenarioene, med hensyn på energibruk og inneklimate. Den eneste forskjellen mellom denne modellen og referansebygget vil være de tiltakene og endringene som blir gjort i dobbelfasaden. Hensikten er at den nye modellen skal være relativt lik en oppbygging som ville vært i virkeligheten med implementert solavskjerming og god U-verdi.

Videre i neste avsnitt vil det bli sett på effekten av ulikt vindusareal i bygget og hvordan et større eller mindre vindusareal vil kunne påvirke energibruken og den termiske komforten i bygget. I tillegg vil det bli sett nærmere på om en manuell styring av åpningene mellom omgivelsene og hulrommet vil kunne optimalisere fasadens egenskaper slik at det kan bidra til forbedret inneklimate og lavere energibruk. Til slutt vil det utføres en følsomhetsanalyse på glassfasaden samt en klimadataanalyse.

9.4.1 Forbedret modell

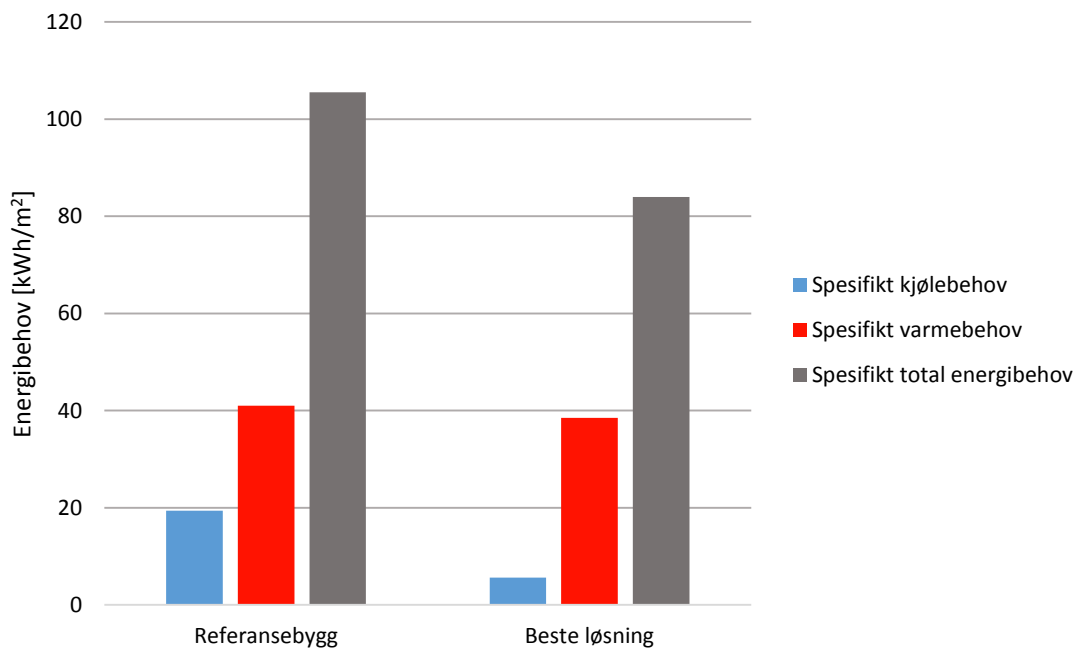
Når man bare tar hensyn til det totale energibehovet, vil den beste løsningen være å bruke U-verdi på $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, med et trippel-glass innerst og et enkelt glass ytterst som det ble vist Figur 64. Samtidig vil den beste plasseringen på solavskjermingen være i hulrommet, hvor det gir riktig g-verdi og reduserer maks PPD i rommet. I tillegg kan vedlikeholdskostnadene reduseres ved at den er beskyttet mot vær og vind. Det er ikke valgt å bruke et hulrom som er helt lukket fra omgivelsene på grunn av mulighetene for overopphetning i sommermånedene. Den forbedrede modellen vil være oppbygd som vist i Tabell 24.

Tabell 24: Utforming av forbedret dobbelfasade

«Beste løsning»		
Type glass:	Innvendig	Trippelglass
	Utvendig	Singelglass
	U-verdi glass + solavskjerming	$0,64 \text{ W/m}^2\text{K}$
g-verdi glass + solavskjerming		0,248
Dybde hulrom		0,6 m
Solavskjerming		I hulrommet
Åpningsstørrelse		5 % av glassarealet
Ventilasjon		Naturlig

For å unngå overopphetning om sommeren, men samtidig ha mulighet for å bruke hulrommet som en termisk buffer, er det valgt et åpningsareal på 5 % av glassfasaden. Denne åpningsstørrelsen gir høyere temperaturer i hulrommet sammenlignet med større åpninger, samtidig som volumstrømmen vil kunne fjerne en del varme om sommeren. En slik åpning vil også kunne redusere risikoen for at fugler og andre insekter skal kunne komme inn i hulrommet. Dybden på hulrommet er valgt til 0,6 m, da dette er den smaleste dybden hvor det er lov å bevege seg i hulrommet dersom det skal utføres vedlikehold.

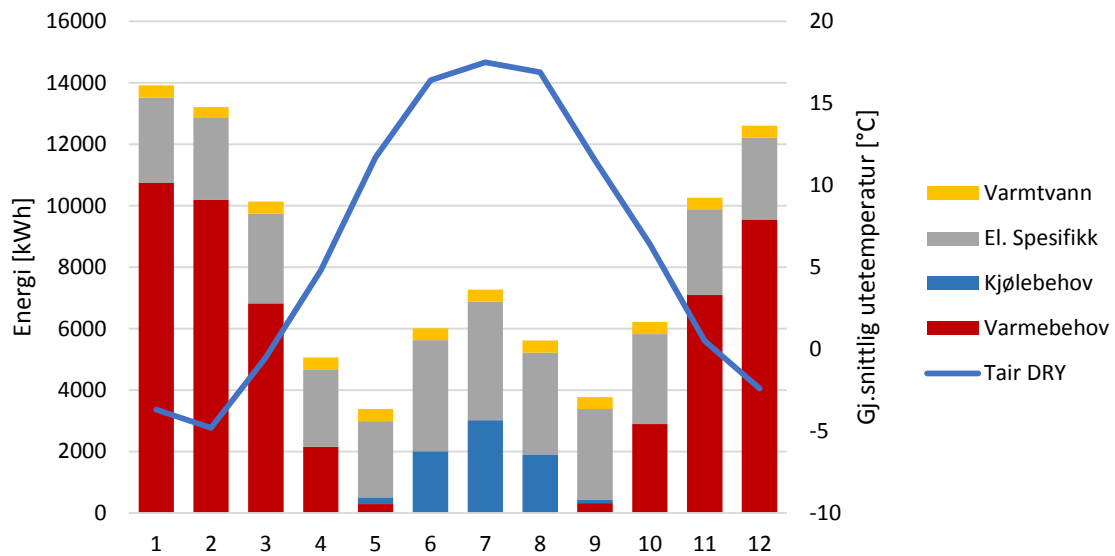
Figur 65 viser hvordan det spesifikke energibehovet, i modellen med forbedret dobbelfasade, har endret seg fra løsningen i referansebygget.



Figur 65: Energibehov for referansebygget sammenlignet med den beste løsningen for dobbelfasaden

Ved forbedret løsning er energibehovet redusert med nesten 20 %. Her er det spesifikke varme- og kjølebehovet redusert med henholdsvis 7 % og 72 %. Det totale spesifikke varme- og kjølebehovet for den optimale løsningen, som sett i Figur 65 er henholdsvis 38,5 kWh/m² og 5,6 kWh/m². Ingen av modellene vil møte kravet for varmebehov som er satt for passivhusstandarden. Kravet ligger hele 18,5 kWh/m² under de simulerte resultatene for modellen med den beste løsningen på dobbelfasaden.

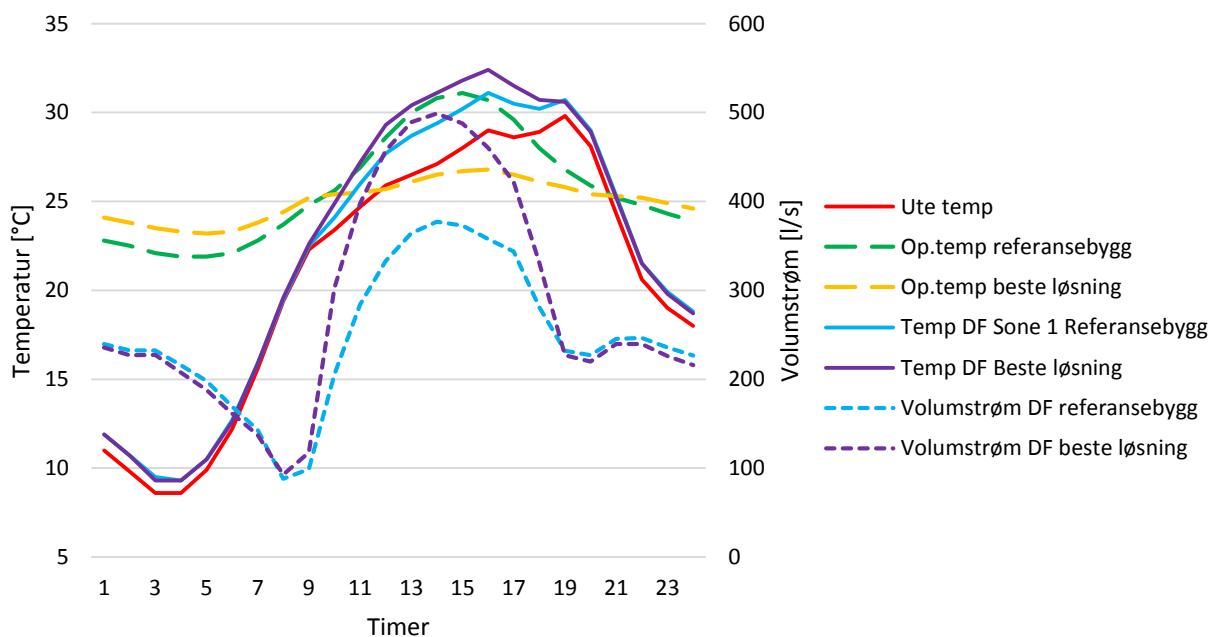
Figur 66 viser det månedlige energibehovet for den forbedrede modellen. Varmebehovet inkluderer romoppvarming og ventilasjon, kjølebehovet inkluderer romkjøling fra ventilasjon mens el.spesifikk er levert energi til bygningen og inkluderer elektrisitet for lys, utstyr, vifter og pumper.



Figur 66: Månedlig energibehov for referansebygget med beste løsning på den doble fasaden

For den beste løsningen for dobbelfasaden i referansebygget er energien som trengs for å dekke varmebehovet for romoppvarming og varme til ventilasjon på 10 735 kWh, en reduisering på omtrent 15 % fra referansebygget. Som figuren viser er det nesten ikke noe varmebehov i bygget fra mai til august. I tillegg er det totale kjølebehovet redusert fra 25 180,7 kWh til 7 268,1 kWh, en reduisering på rundt 72 %. Det totale spesifikke energibehovet for bygget med antatt beste løsning på den doble fasaden vil være på 84 kWh/m² og vil altså møte energirammekravet satt i passivhusstandarden som er på 95 kWh/m².

Det er valgt å se nærmere på en sommersituasjon, for å se på sammenhengen mellom temperaturer og volumstrøm i hulrommet. Som Figur 67 viser vil volumstrømmen være avhengig av Δt , temperaturdifferansen, mellom hulrommet og utetemperaturen. Desto større Δt dess større blir volumstrømmen i hulrommet på grunn av den termiske oppdriften.



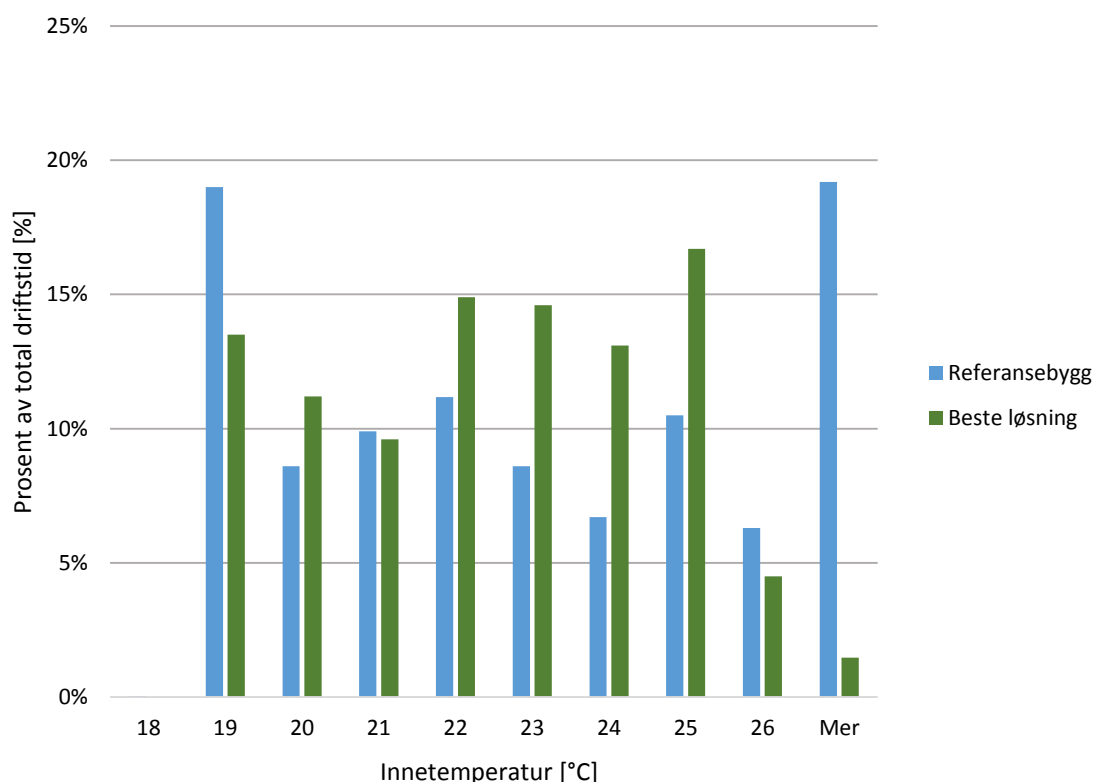
Figur 67: Sommersituasjon 16/6-1015, sammenheng mellom temperaturer og volumstrøm i hulrommet

I referansebygget vil glassene ha en tilnærmet U-verdi på til sammen 1,1 W/m²K. Dette kan indikere at mye av solstrålingen som tilføres den doble fasaden direkte vil bli overført til rommet som ligger bak den doble fasaden, uten at den reflekteres tilbake til hulrommet. Som figuren viser vil temperaturen i hulrommet, hvor det er implementert solavskjerming samt bedre U-verdi på den doble fasaden, være større enn for referansebygget uten solavskjerming. Dette kan indikere at varmen blir «fanget» i hulrommet. Det antas av mye av varmen som treffer solavskjermingen vil reflekteres tilbake til hulrommet og dermed øke temperaturnivået her.

Siden varmen ikke direkte blir overført til rommet, vil den operative temperaturen i sonen bak den doble fasaden holde seg på et akseptabelt nivå, selv om det er sommer. Derimot vil referansebygget, som får mye direkte varme overført til rommet, ha en temperatur som er ukomfortabel høy. Som figuren også viser vil Δt mellom hulrommet og utetemperaturen være ganske liten, en av grunnene til dette kan være at hulrommet bare er 2,9 m og at dermed mye av varmen som tilføres hulrommet blir transportert ut med luftstrømmen.

Sammenligning av innklimaet i referansebygget og modellen med forbedret dobbelfasade

Figur 68 viser den prosentvise operative temperaturen av total driftstid i Sone 1, for referansebygget og modellen med den beste løsningen på den doble fasaden. Figuren vil ikke gi et helt nøyaktig bilde for hele året da den har tatt med hele driftstiden, også helgene hvor ventilasjonsanlegget vil være slått av. Dermed vil den operative temperaturen, vist i figuren, ha en del timer hvor temperaturen er veldig høy på sommeren og lav på vinteren. Likevel kan man få et bilde av hvordan innetemperaturen i Sone 1 fordeler seg i løpet av året for de to modellene med ulik dobbelfasade.

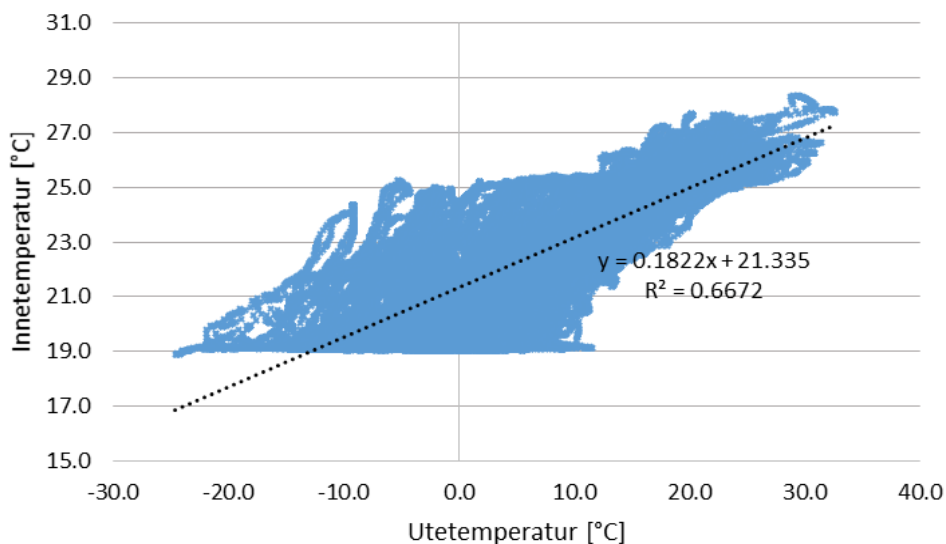


Figur 68: Prosentvis operativ temperatur av total driftstid i Sone 1

Som det ble nevnt i delkapittel 4.4.1 Termisk miljø, anbefales det at temperaturen så langt som mulig holdes under 22 °C når det er oppvarmingsbehov, siden produktiviteten i kontorbygget vil være høyest da. Figuren indikerer at begge modellene vil klare å holde en temperatur under 22 °C omtrent

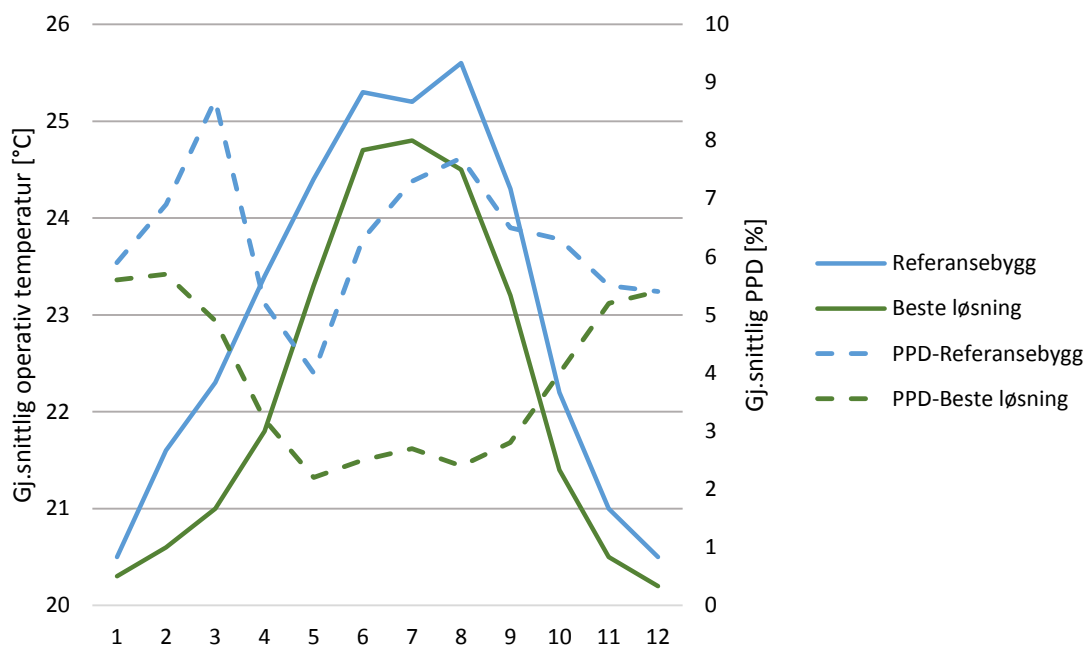
50 % av tiden. Derimot vil ikke dette gi et riktig bilde i forhold til hvilket bygg som vil gi den beste termiske komforten. Resultatene viser at det er vanligst at temperaturen i referansebygget vil ligge på 19 °C og mer enn 26 °C. Dette tilsier at den termiske komforten i løpet av året vil være dårlig for dette referansebygget selv om den prosentvise operative temperaturen vil være under 22 °C, 50 % av tiden. Som figuren illustrerer vil modellen med den beste løsningen på den doble fasaden ha innetemperatur på over 26 °C, bare 1 % av total driftstid mens den i referansebygget vil være på nesten 20 %. Dette indikerer at det både er nødvendig og viktig å gjøre en analyse på hvilke tiltak som må innføres i den doble fasaden for å optimalisere og finne en løsning som passer for det spesifikke bygget.

Sammenhengen mellom inne- og utetemperatur for kontorbygget med forbedret dobbelfasade vises i Figur 69. Ved høyere utetemperatur øker innetemperaturen i Sone 1. Dette indikerer at den operative temperaturen i bygget er påvirket av utetemperaturen. Også her er helgene hvor ventilasjonsanlegget er slått av tatt med i betraktningen. Figuren viser derfor en større andel med både høye og lave temperaturer. Den maksimale temperaturen i Sone 1 for modellen med den beste løsningen på dobbelfasaden under okkuperte timer vil, som tidligere nevnt, være på 26,9 °C.



Figur 69: Forholdet mellom innetemperatur i Sone 1 og utetemperatur

Som figuren illustrerer vil det være stor variasjon i temperaturen utendørs i løpet av ett år. For å se nærmere på hvordan PPD-verdien i sonene avhenger av den operative temperaturen, er det valgt å fremstille disse på i samme graf. Den gjennomsnittlige operative temperaturen og gjennomsnittlig PPD i Sone 1, for referansebygget og modellen med den beste løsningen på dobbelfasaden, vises i Figur 70.



Figur 70: Gjennomsnittlig operativ temperatur og gjennomsnittlig PPD i Sone 1

Den beste løsningen på dobbelfasaden vil redusere den gjennomsnittlige operative temperaturen gjennom hele året som vist i figuren over. PPD-nivået for den beste løsningen av dobbelfasaden vil ha en bedre PPD-verdi enn referansebygget og dette er en gjentakende hendelse. Årsaken er at modellen med forbedret dobbelfasade vil kunne stenge ute varmen fra solstrålingen med solavskjermingssystemet. Siden referansebygget ikke har solavskjerming implementert, vil all solstråling varme opp sonen direkte. Som figuren illustrerer vil ikke modellen med den beste løsningen ha gjennomsnittlig operativ temperatur over 25 °C noen av månedene, og dette vil forbedre den termiske komforten i bygget.

Den termiske komforten for referansebygget og den beste løsningen vises i Tabell 25.

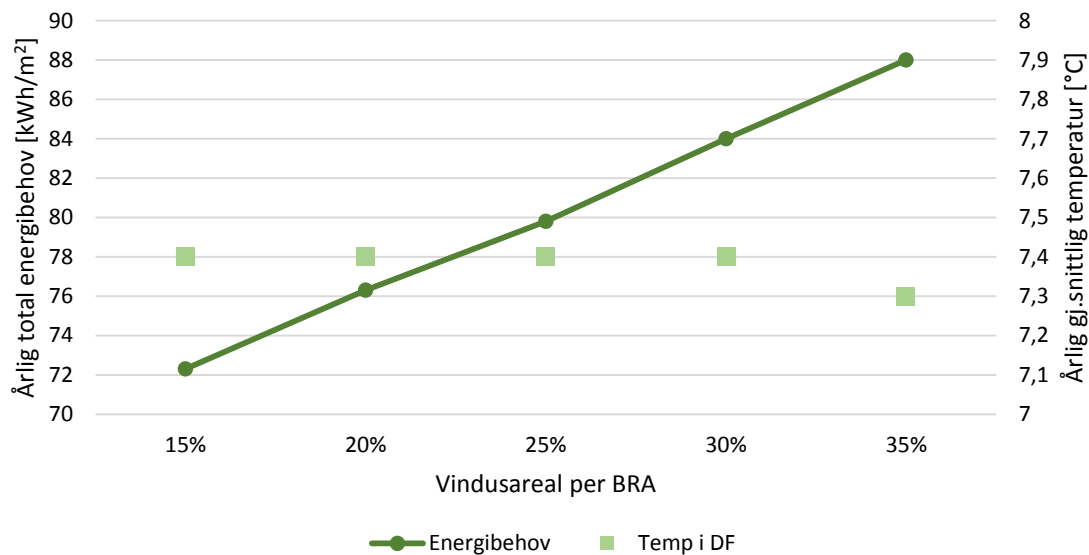
Tabell 25: Termisk komfort ved beste løsning og referansebygg i Sone 1

Sone 1 Komfortkategori	Prosentvis tid av okkuperte timer	
	Referansebygg	Beste løsning
I – Best	53 %	79 %
II – Bra	61 %	89 %
III – Akseptabelt	69 %	97 %
IV - Uakseptabelt	31 %	3 %

Hvordan den termiske komforten har forbedret seg vises tydelig i tabellen. Den uakseptable PMV og PPD verdien er redusert fra 31 % i referansebygget til bare 3 % for den beste løsningen på dobbelfasaden, med en U-verdi på 0,7 W/m²K og solavskjerming i hulrommet.

9.4.2 Ulik størrelse på vindusarealet

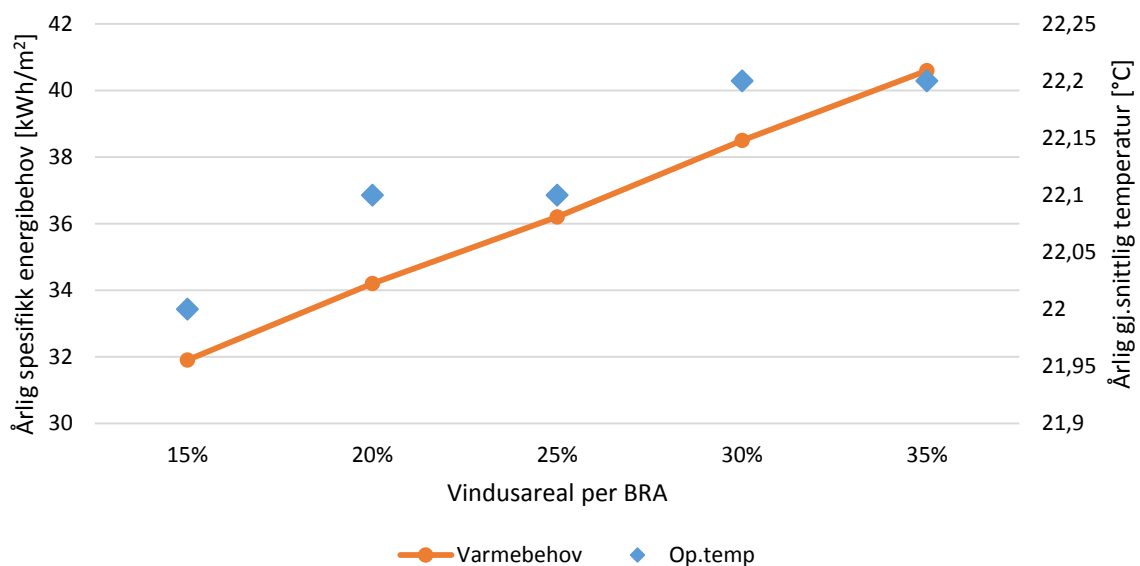
For å få en oversikt over hvordan arealet på vinduene vil kunne påvirke energibehovet samt den termiske komforten i bygget er det valgt å kjøre modellen med ulikt vindusareal, hvor fokuset ligger på modellen med den beste løsningen på dobbelfasaden. Hvordan det totale energibehovet i bygget samt temperaturen i den doble fasaden endres med det økt vindusareal vises i Figur 71.



Figur 71: Årlig total energibehov og gjennomsnittlig temperatur i den doble fasaden ved økende vindusareal

Som Figur 71 illustrerer vil det totale energibehovet i bygget øke med økt vindusareal. Modellen vil ha en økning på omtrent 18 % i energibehovet fra minste til største vindusareal. Dette utgjør en økning på 15,7 kWh/m² hvert år. Derimot kan en se at den gjennomsnittlige temperaturen i hulrommet ikke blir særlig påvirket av vindusarealet, bare et vindusareal på 35 % reduserer temperaturen i den doble fasaden med omtrent 2 % fra resten.

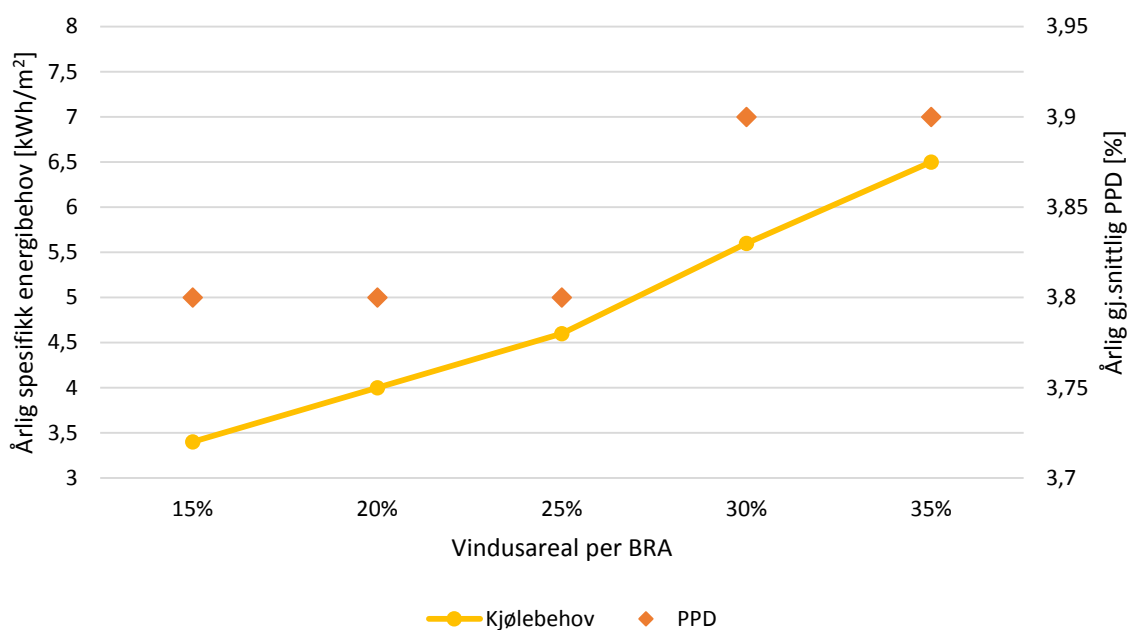
Figur 72 viser varmebehovet til bygget samt den gjennomsnittlige operative temperaturen i Sone 1 ved økende vindusareal.



Figur 72: Varmebehov og gjennomsnittlig operativ temperatur i Sone 1, ved økende vindusareal

Som Figur 72 illustrerer, øker det spesifikke varmebehovet i bygget dersom vindusarealet øker. For energibruk ved oppvarming vil det utgjøre en reduksjon på omtrent 10 kWh/m² fra det største vindusarealet til det minste. Hovedårsaken er at mye varme går tapt gjennom det store vindusarealet som har en mye dårligere varmemotstand enn selve bygningskroppen. I følge Sintef Energiforskning (2007) vil en glassfasade ha større varmetap gjennom fyringssesongen enn en isolert yttervegg, og dette vises i figuren. Her vil varme forsvinne gjennom glassarealet desto større det er. Den årlige gjennomsnittlige temperaturen i Sone 1, vil også øke med økende vindusareal, men denne økningen er forholdsvis liten, og vil bare ha en forskjell på 0,2 °C.

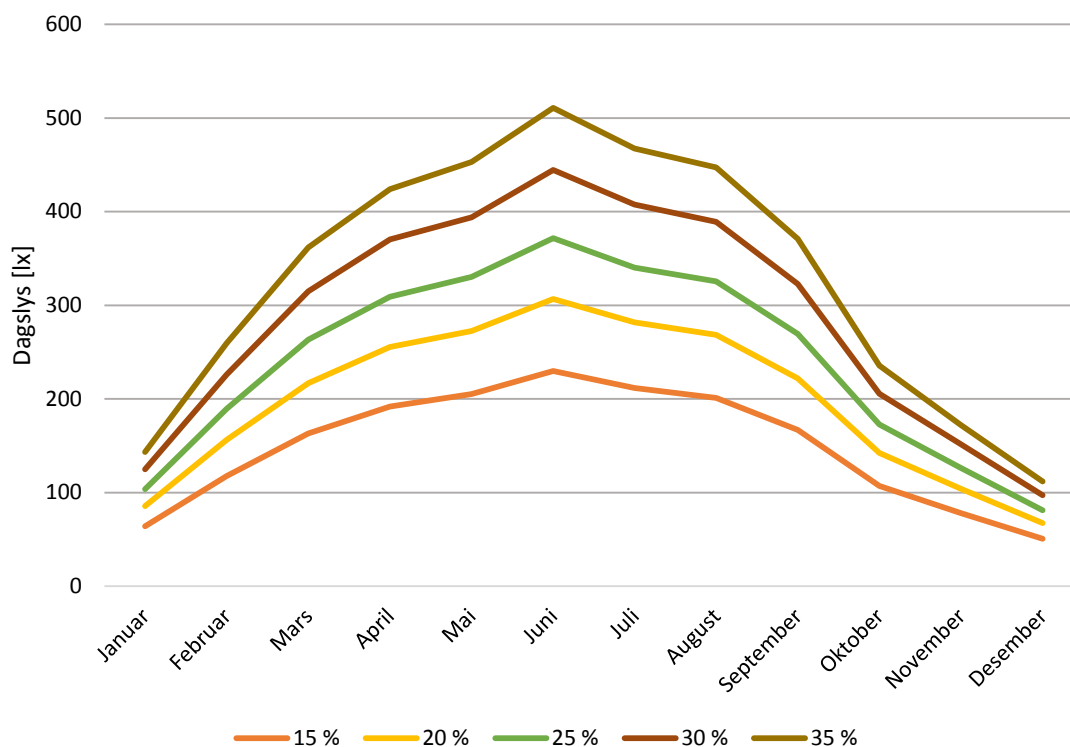
Figur 73 viser kjølebehovet i bygget samt den årlige gjennomsnittlige PPD i Sone 1 ved økende vindusareal.



Figur 73: Kjølebehov og årlig gjennomsnittlig PPD i Sone 1, ved økende vindusareal

Som det kan sees fra Figur 73, vil det spesifikke kjølebehovet blir større dersom vindusarealet øker. Større vindusareal betyr også at mer solinnstråling vil slippe inn til sonene. Dermed vil det være mere varme som må fjernes fra sonene for å oppnå akseptabel termisk komfort. Kjølebehovet øker med omtrent 45 % fra minste vindusareal til største. På dager med lav utetemperatur kan vindusflatene fungere som store kjøleflater. Siden kald luft er tyngre enn varm luft vil denne synke ned mot gulvet og kunne skape dårlig termisk komfort i sonen. Den årlige gjennomsnittlige PPD-verdien i Sone 1 øker også med økende vindusareal. Dette kan indikere at Sone 1, ved et vindusareal på 35 % av BRA, vil kunne oppleves varmt på sommerstid og kaldt på vinterstid på grunn av det høye kjøle- og varmebehovet. Det kan dermed antas at det spesifikke energibehovet i en bygning vil kunne reduseres ved å bruke et vindusareal som er mindre, samtidig er det viktig at alle kravene i standardene følges.

Figur 74 viser dagslys ved den første kontorpulten ved vinduet i Sone 1 ved økende vindusareal med implementert solavskjerming.



Figur 74: Dagslys ved første kontorpult ved vinduet i Sone 1 ved økende vindusareal

Figuren viser at gjennom hele året så vil mindre vindusareal gi lavere dagslys i sonen. Dagslysnivået vil altså være vanskelig å utnytte dersom det er blitt benyttet et beskjedent glassareal i fasaden.

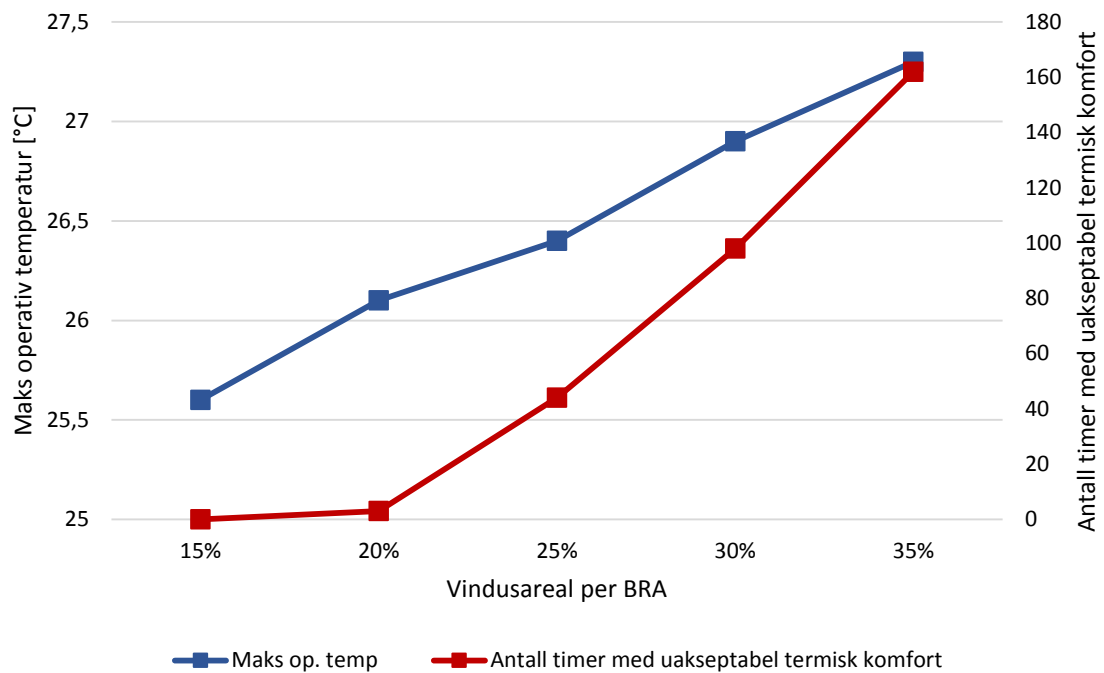
Mars vil ha en solhøyde, som tidligere nevnt, på 30°, og belyningsstyrken på et horisontalplan utendørs ved en overskyet himmel vil da være omtrent 15 000 lux. Dagslysfaktoren ved første kontorpult i Sone 1 for modellen med den forbedrede dobbelfasaden finnes dermed ved å bruke verdiene for intern belyningsstyrke funnet i mars i Figur 74. Dagslysfaktoren for mars måned finnes i Tabell 26, og er beregnet ut fra Ligning 22.

Tabell 26: Forenklet beregning av gjennomsnittlig dagslysfaktor ved kontorpult 1 i Sone 1 i mars måned, med solavskjerming

Mars måned	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %
Ekstern belyningsstyrke [lux]	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
Intern belyningsstyrke [lux]	163	216,9	263,1	315	361,8
Dagslysfaktor	1,08	1,44	1,75	2,1	2,4

Tabellen viser at de små vindusarealene fra 15 % til 25 % av BRA ikke vil oppfylle kravene for gjennomsnittlig dagslysfaktoren som skal ligge på over 2 %. Det er de store vindusarealene fra 30 % til 35 % av BRA som klarer å oppnå en dagslysfaktor som tilfredsstiller kravene som er satt i veiledningen for TEK 10. Utgangspunktet for modellen har et vindusareal på 30 % av BRA, og tabellen viser at dagslysfaktoren her vil være på 2,1 %. Behovet for hvor mye dagslys som kan slippes inn i sonen vil altså, ut fra Figur 74, kreve en minstestørrelse på vindusarealet. Derimot vil behovet for å kontrollere både temperatur og energibruk, som sett fra Figur 71, sette en maksimumstørrelse på glassarealet til sonene. Det er altså viktig at solavskjermingssystemet kan kontrollere solvarmen for å redusere energien som trengs for kjøling, og på samme tid kontrollere innendørs dagslys og unngå blanding.

Den maksimale operative temperaturen i Sone 1 øker med økende vindusareal, fra 25,6 °C til 27,3 °C som vist i Figur 75.



Figur 75: Maks operativ temperatur og antall timer med uakseptabel termisk komfort i Sone 1 ved økende vindusareal

Den økte solinnstrålingen gjennom vinduene øker altså den maksimale operative temperaturen fra minste til største vindusareal med omtrent 7 %. Dette er en økning som reduserer den termiske komforten i sonen. Antall timer med uakseptabel komfort har økt fra 0 timer ved minste vindusareal til 162 timer ved størst vindusareal.

Den termiske komforten i Sone 1, ved ulike vindusareal vises i Tabell 27, og indikerer at den uakseptable PMV og PPD verdien øker med økende vindusareal.

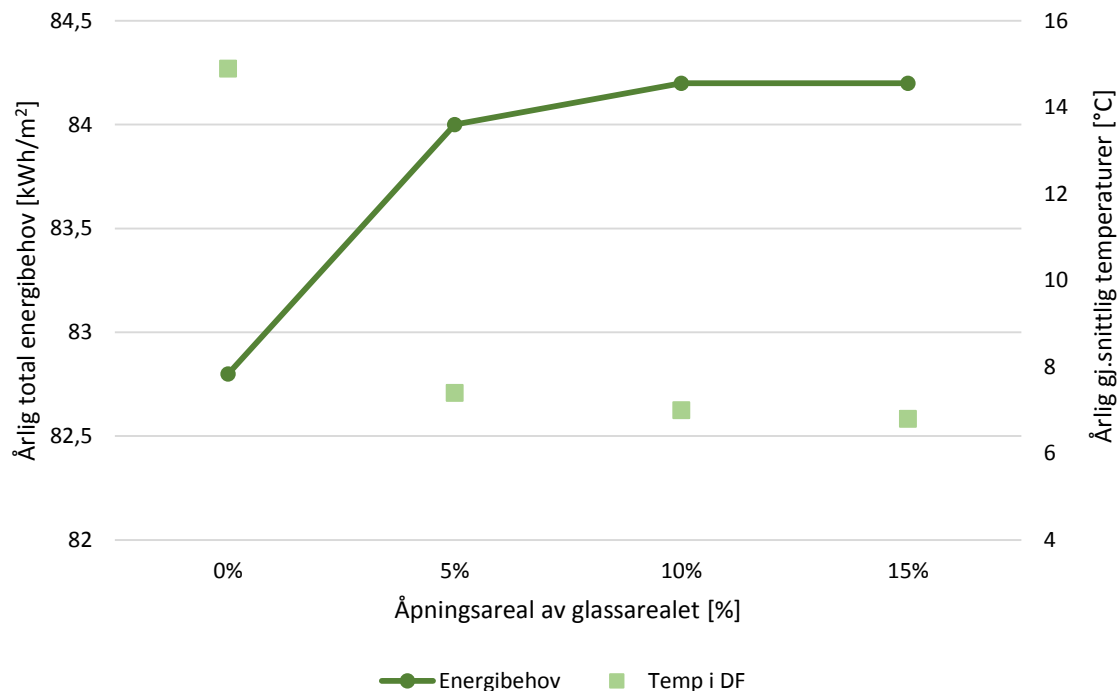
Tabell 27: Termisk komfort Sone 1, ved ulike vindusareal

Sone 1 Komfortkategori	Prosentvis tid av okkuperte timer				
	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %
I – Best	94 %	89 %	84 %	79 %	75 %
II – Bra	99 %	97 %	94 %	89 %	85 %
III – Akseptabelt	100 %	100 %	99 %	97 %	95 %
IV - Uakseptabelt	0 %	0 %	1 %	3 %	5 %

Et stort glassareal vil altså kunne gi økt utnyttelse av dagslys, bedre utsyn og økt visuell komfort, men vil samtidig trenge større energibehov for å opprettholde tilfredsstillende termisk komfort i sonene.

9.4.3 Effekt av endring i åpningene mellom hulrommet og omgivelsene

Det er interessant å sjekke om energibehovet i modellen med bedre U-verdi samt implementert solavskjermingssystem i den doble fasaden vil bli påvirket av en endring i størrelsen på åpningen mellom hulrommet og omgivelsene. Derfor er det valgt å gjennomføre samme analyse på endringen i ulike åpningsareal på modellen med den beste løsningen på dobbelfasaden som det ble gjort på referansebygget. Årlig energibehov og gjennomsnittlig temperatur i den doble fasaden vises i Figur 76.

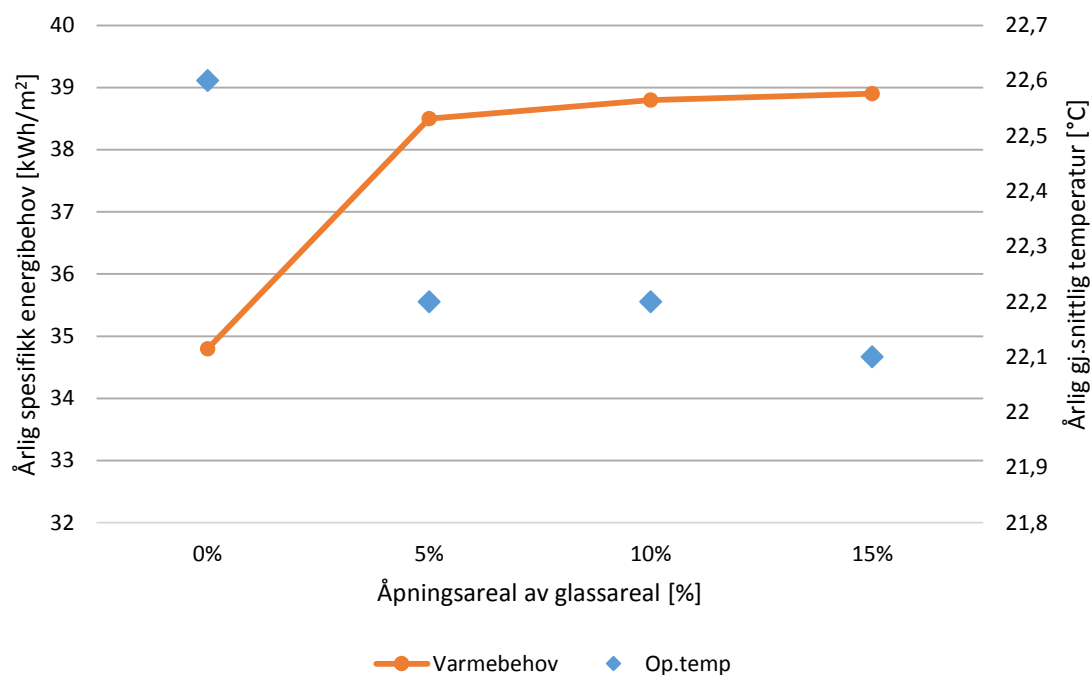


Figur 76: Årlig total energibehov og gjennomsnittlig temperatur for ulike åpningsareal mellom hulrommet og omgivelsene

Akkurat som for referansebygget vil den største endringen i totalt energibehov i modellen med forbedret dobbelfasade være med hulrommet som en lukket statisk buffer, hvor det ikke er åpent mellom hulrommet og omgivelsene. Endringen fra 0 % til 5 % er på omtrent 2 % for det totale energibehovet. Det forekommer en enda mindre endring i energibehovet ved endring i åpningen fra 5 % til 10 %, som kun vil være på omtrent 0,3 %. Dette betyr at ved åpning mellom hulrommet og omgivelsene så vil ikke selve størrelsen på åpningen gi betydelige utslag på det totale energibehovet så lenge størrelsen på åpningene mellom hulrommet og omgivelsene er endret innenfor rimelighetens grenser.

Den årlige gjennomsnittlige temperaturen i hulrommet vil være omtrent 8 % lavere for åpningen på 15 % sammenlignet med åpningen på 5 %. Den største forandringen vil være den årlige gjennomsnittlige temperaturen i hulrommet, som vil reduseres med 55 % med endring fra lukket hulrom til største åpning på 15 % av glassarealet. Det antas at den høye temperaturen med et lukket hulrom, altså på 0 % av glassarealet, vil kunne forverre den termiske komforten i sonene innenfor.

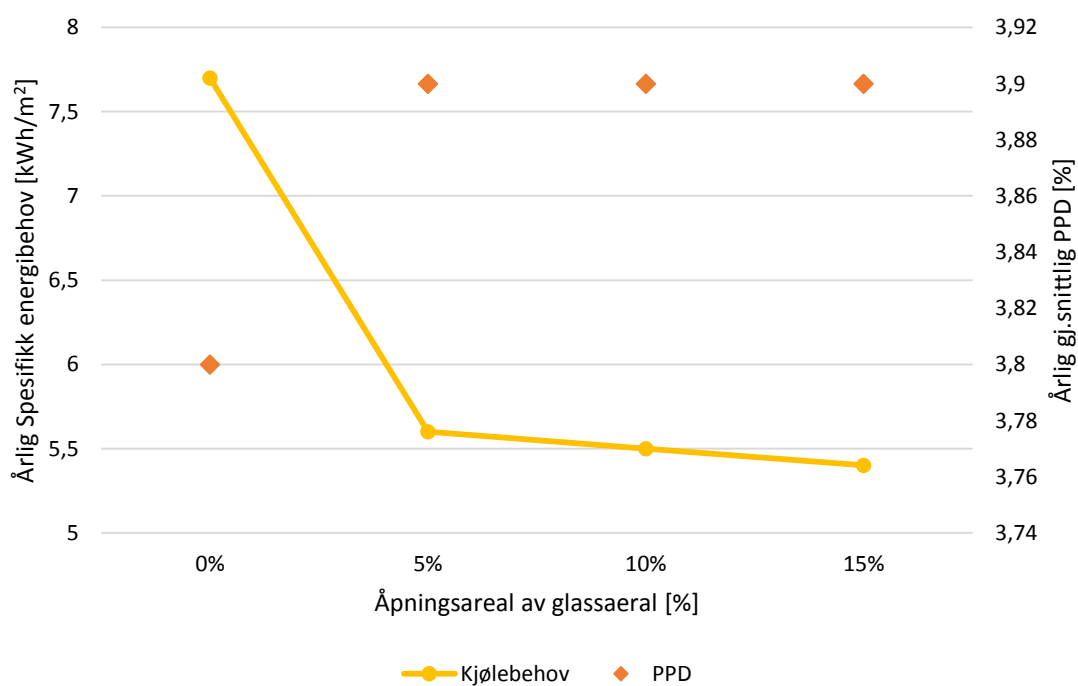
Som Figur 77 illustrerer vil det spesifikke varmebehovet i bygget øke med større åpning mellom hulrommet og omgivelsene. Figuren viser at det lukkede hulrom vil gi både høyest gjennomsnittlig operativ temperatur samt maks operativ temperatur i Sone 1. Den årlige gjennomsnittlige operative temperaturen i Sone 1 har økt med 0,5 °C fra største åpning til modellen hvor åpningen er helt lukket.



Figur 77: Spesifikt varmebehov og årlig gjennomsnittlig operativ temperatur for ulike åpningsarealer mellom hulrommet og omgivelsene

Både den årlig gjennomsnittlige operative temperaturen i sonen og temperaturen i hulrommet reduseres ved økende åpning slik som vist i Figur 76 og Figur 77.

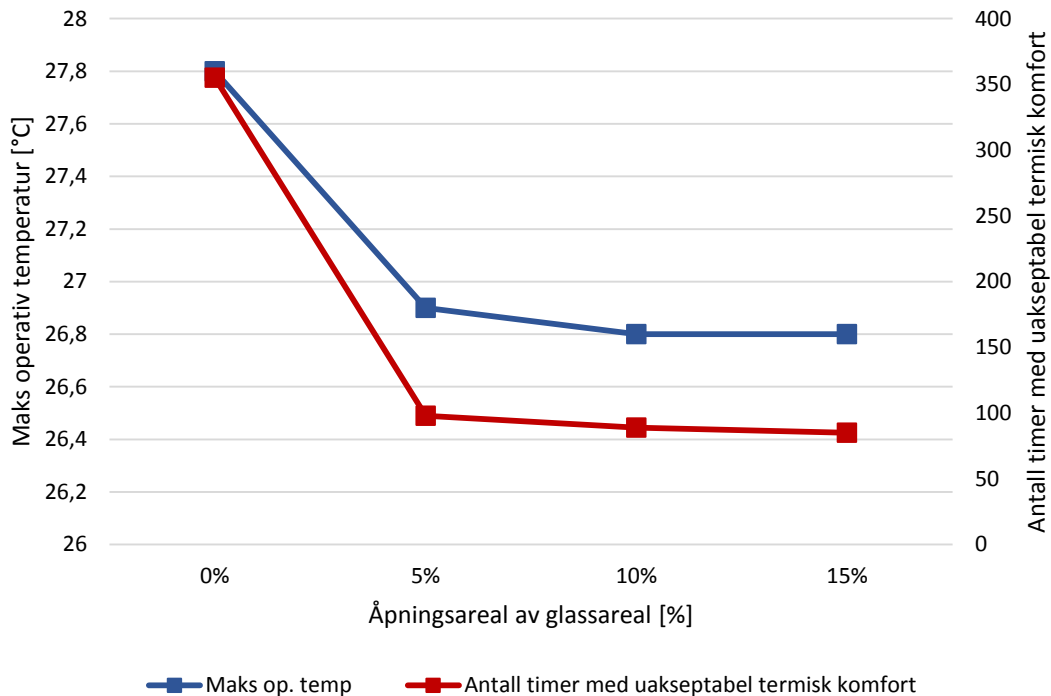
For kjølebehovet i bygget viser det seg at dette blir redusert ved økende åpningsareal, som vist i Figur 78.



Figur 78: Årlig kjølebehov samt gjennomsnittlig PPD i Sone 1 for ulike åpningsarealer mellom hulrommet og omgivelsene

Det kan leses av Figur 78 at den gjennomsnittlige PPD-verdien vil være lavest ved lukket hulrom, og vil ikke være påvirket av selve åpningsstørrelsen når hulrommet er åpent til omgivelsene.

Figur 79 viser den maksimale operative temperaturen og antall timer med uakseptabel termisk komfort i Sone 1 for økende åpning i hulrommet.



Figur 79: Maks operativ temperatur og antall timer med uakseptabel termisk komfort i Sone 1 for ulike åpningsstørrelser

Den maksimale operative temperaturen i Sone 1, fra minste til største åpningsareal, reduseres med omtrent 4 %. Denne reduksjonen forbedrer den termiske komforten i sonen, da antall timer med uakseptabel komfort er redusert fra 355 timer ved minste til 85 timer ved største åpningsareal. Det høye antall timer med uakseptabel termisk komfort i modellen med lukket hulrom, har bakgrunn i de høye temperaturene som forekommer på sommeren på grunn av overopphetning i dobbelfasaden fra Figur 76 og Figur 77.

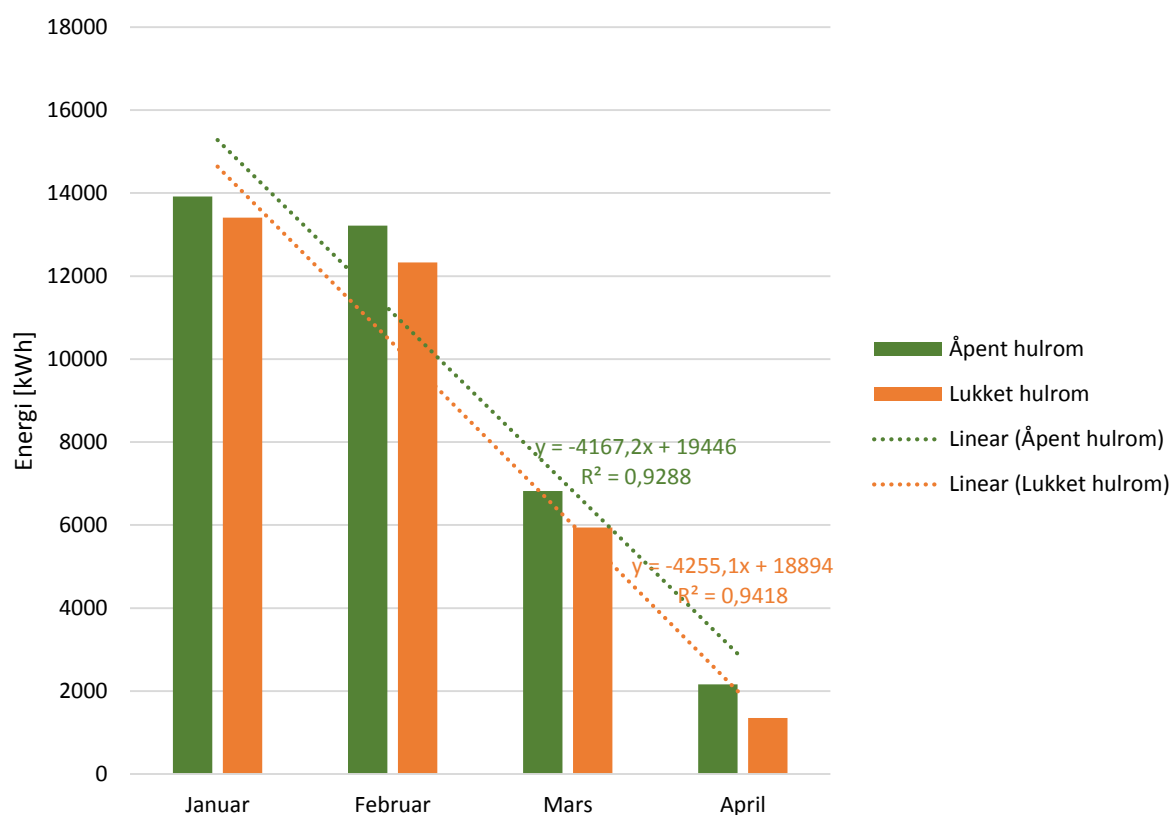
På bakgrunn av resultatene gjort i dette delkapittelet kan det tenkes at årlig energibehov samt termisk komfort vil kunne forbedres ved å ha lukket hulrom i vintermånedene og åpent hulrom i sommermånedene. Dette vil det bli sett nærmere på i neste delkapittel: 9.9.4 Manuell styring av åpningene mellom omgivelsene og hulrommet.

9.4.4 Manuell styring av åpningen mellom omgivelsene og hulrommet

Med doble fasader med styrbare ventilasjonsåpninger og solavskjerming har man flere muligheter for å regulere hvor mye varme som fanges i fasademellomrommet, ventileres bort eller transmitteres direkte gjennom fasaden (Bryn et al., 2014). IDA ICE opererer ikke med funksjon for å styre åpningene i den doble fasaden manuelt i løpet av et år. Dermed vil det ikke være mulig å sjekke ut hvordan energibehovet og inneklimate endres ved å kunne åpne og lukke hulrommet fra omgivelsene etter hvordan ulike parametere som vindhastigheten, utetemperaturen samt temperaturen i hulrommet varierer.

Det ble derfor valgt å sammenligne vintermånedene i en årssimulering for den beste løsningen hvor «Åpent hulrom» tilsvarer en størrelse på åpningen på 5 % av glassarealet mot et «Lukket hulrom» hvor åpningen er 0 % av glassarealet. Altså vil det kjøres en simulering med åpent hulrom til omgivelsene og en hvor hulrommet er lukket til omgivelsene. Her vil det bli sett på om det kan oppnås noen besparelser i energibehovet samt om det vil være mulig å forbedre inneklimate siden temperaturen i hulrommet er forholdsvis høyere i den lukkede løsningen, som sett i tidligere resultater.

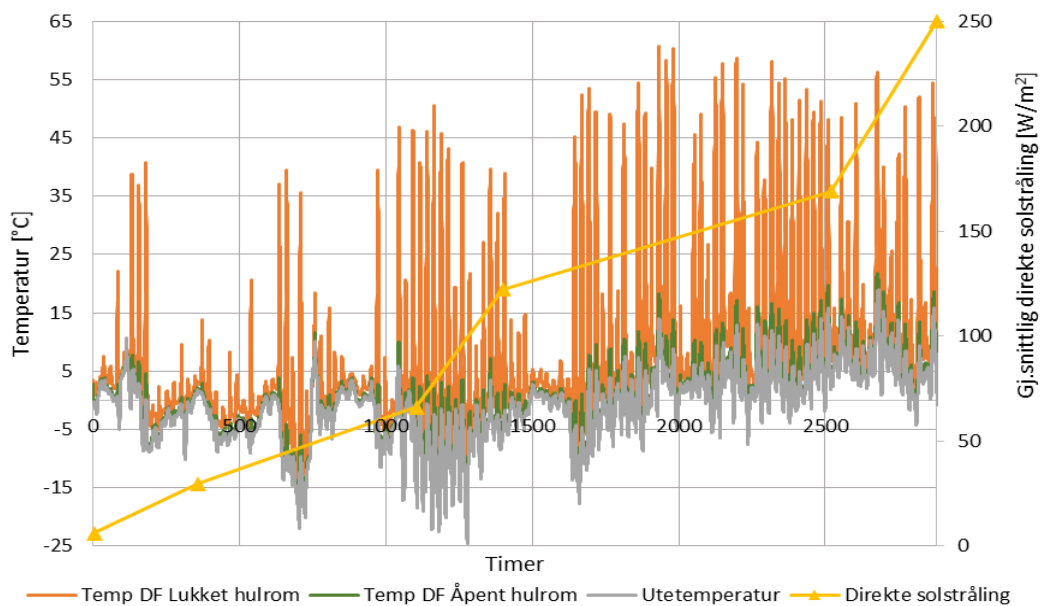
Det er valgt å se på en tidsintervall for de fire første månedene i året da det antas at dette vil være forholdsvis kalde måneder. På denne måten vil det være mulig at det lukkede hulrommet kan ha positiv effekt på varmebehovet i bygget. På grunn av faren for overopphetning, som vist i tidligere resultater, er det valgt ikke å se på sommermånedene. Figur 80 viser varmebehovet for kontorbygget med forbedret dobbelfasade med lukket og åpent hulrom.



Figur 80: Varmebehov for kontorbygget med den beste løsningen på dobbelfasaden med åpent og lukket hulrommet i de første vintermånedene i året

Som figuren viser reduseres varmebehovet for kontorbygget dersom hulrommet er lukket i de fire første månedene. Gjennomsnittlig er varmebehovet her redusert med omtrent 9 %. Det kan tenkes at det samme vil skje i vintermånedene oktober, november og desember også, og dermed vil det være mulig for ekstra sparing i det totale varmebehovet i bygget. Ingen av de foregående scenarioene og implementeringene har klart å nå varmebehovskravet i passivhusstandarden. Som sett fra resultatene her kan det antas at ved et lukket hulrom så vil kontorbygget i alle fall være nærmere maksimumskravet på 20 kWh/m² for varmebehovet i den norske standarden NS 3701:2012, siden varmebehovet i vintermånedene reduseres.

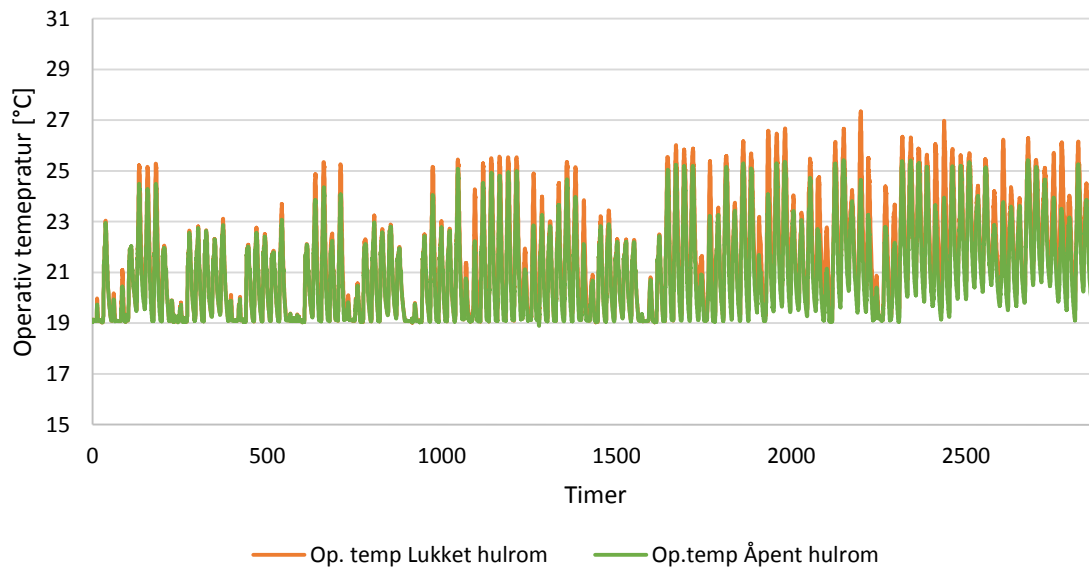
For å få en forståelse av hvordan temperaturen i hulrommet endres i løpet av de første fire månedene er det valgt å vise dette i Figur 81.



Figur 81: Temperatur i hulrommet og solinnstråling de fire første månedene i året med åpent og lukket hulrom

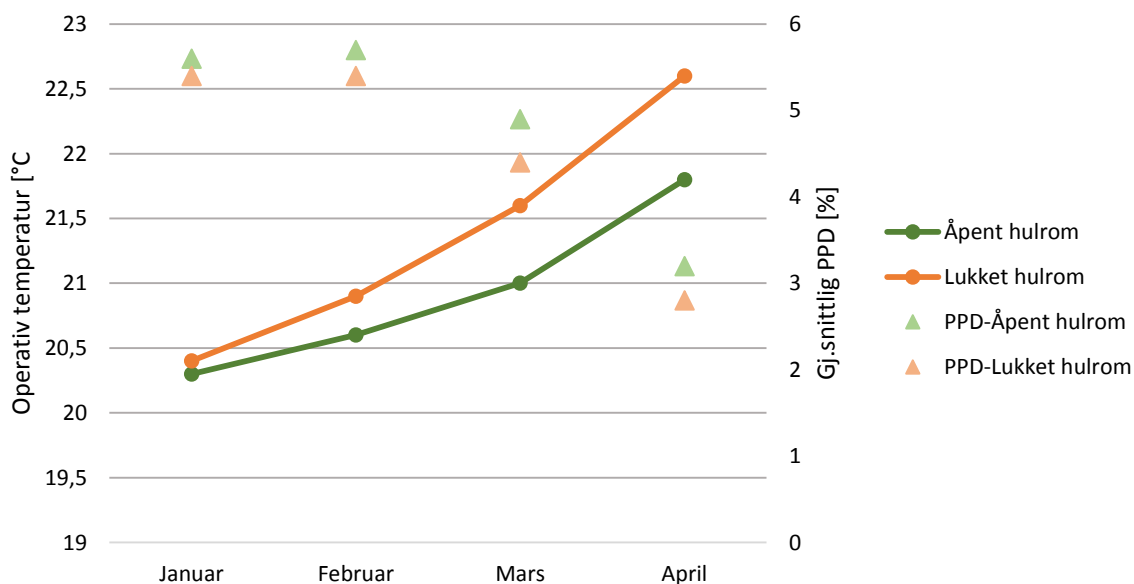
Temperaturen i hulrommet utenfor Sone 1, med lukket hulrom, vil være mye høyere sammenlignet med temperaturen i det åpne hulrommet. Figuren viser at en økning i utetemperatur og solinnstråling, vil øke temperaturen i hulrommet både når den er åpen og når den er lukket. Ved høye temperaturer utendørs, vil det være fare for veldig høye temperaturer i hulrommet dersom det er lukket fra omgivelsene. Fra figuren kan den hentes ut at det i en varmeperiode i slutten av mars kan oppstå temperaturer på hele 45-60 °C i hulrommet. En konsekvens av dette er at de høye temperaturene vil kunne føre til overopphetning av sonen innenfor da mye varme vil overføres gjennom fasaden og glassarealet. Temperaturen i hulrommet, dersom den er åpen, vil også ha høyere temperaturer enn utetemperaturen, men vil aldri oppnå like høye temperaturer eller ha samme effekt på varmebehovet som det lukkede hulrommet har. I følge Oesterle (2001) skal hulrommet i den doble fasaden kunne fungere som ekstra termisk isolasjon på vinterstid, og resultatene her viser at dette best vil kunne oppnås ved å lukke hulrommet fra omgivelsene i vintermånedene.

Som tidligere nevnt vil temperaturen i hulrommet kunne påvirke den operative temperaturen i sonene innenfor den doble fasaden. Som Figur 82 viser vil den operative temperaturen i Sone 1 ofte være høyere for simuleringen med lukket hulrom sammenlignet med simuleringen med åpent hulrom.



Figur 82: Operativ temperatur i Sone 1 for de fire første månedene i året

Ved å sammenligne Figur 81 og Figur 82 er det tydelig at den operative temperaturen i sonen er sterkt avhengig av temperaturen i hulrommet. Dette viser at ved å kunne styre åpningen mellom hulrommet og omgivelsene vil man kunne bruke temperaturen i hulrommet til å varme opp sonene innenfor. Dette vil kunne optimalisere utformingen av den doble fasaden i kontorbygget. For å se hvordan dette påvirker den termiske komforten er det valgt å se på gjennomsnittlig operativ temperatur og PPD i Sone 1 for de fire første månedene i året. Dette vises i Figur 83.

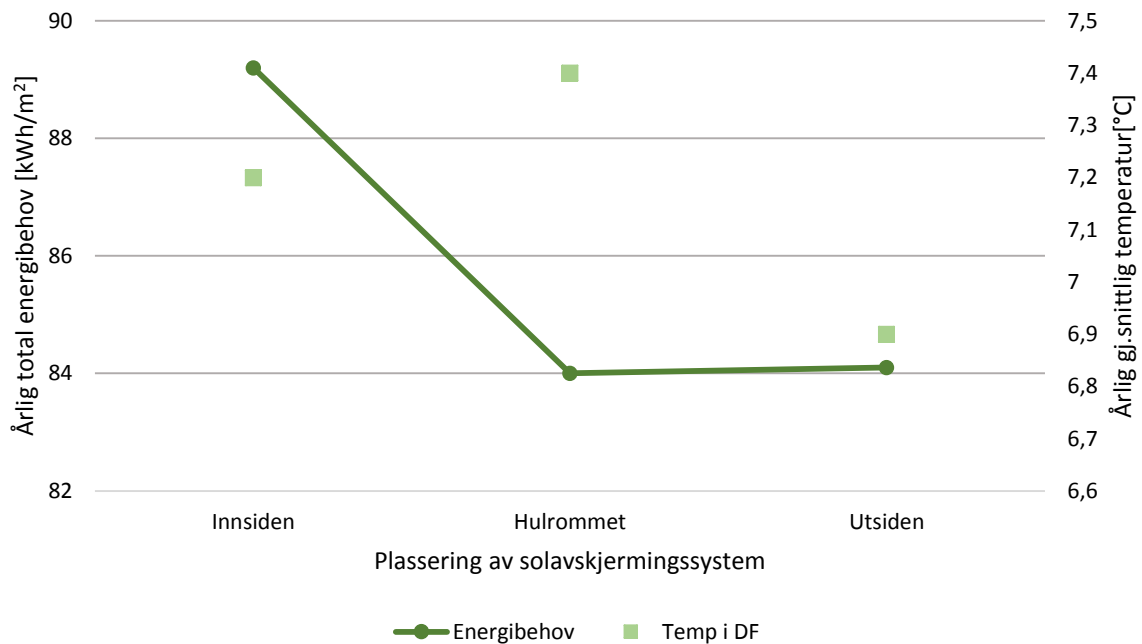


Figur 83: Gjennomsnittlig operativ temperatur og PPD i Sone 1

Som figuren illustrerer ligger de gjennomsnittlige PPD-verdiene i de fire første månedene på et lavere nivå for modellen med lukket hulrom sammenlignet med åpent hulrom. Ved å se på den gjennomsnittlige operative temperaturen opererer modellen med lukket hulrom med gjennomsnittlig høyere operative temperaturer i Sone 1. Dette indikerer at det er mulig å forbedre den termiske komforten dersom åpningen mellom hulrommet og omgivelsene kan styres manuelt etter utetemperatur og temperaturen i den doble fasaden.

9.4.5 Effekt av ulik plassering av solavskjermingssystemet for forbedret modell

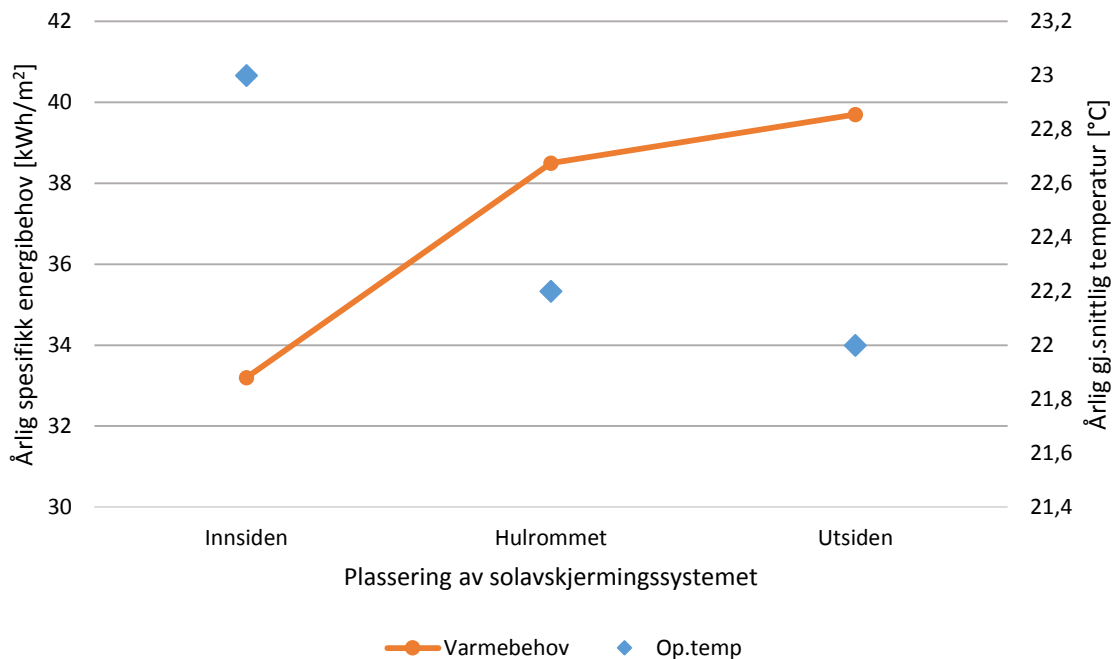
Det vil være interessant å se hvordan modellen med den beste løsningen på den doble fasaden blir påvirket av plasseringen av solavskjermingen, da U-verdien i bygget tilfredsstillende kravene for passivhusstandard. Modellen for den forbedrede dobbelfasaden har allerede implementert solavskjerming i hulrommet, men det vil være interessant å sammenligne den med innvendig og utvendig plassering. Figur 84 illustrerer endringen i energibehovet og den årlige gjennomsnittlige temperaturen i dobbelfasaden ved ulik plassering av solavskjermingssystemet.



Figur 84: Energibehov og temperatur i den doble fasaden ved ulik plassering av solavskjermingssystemet

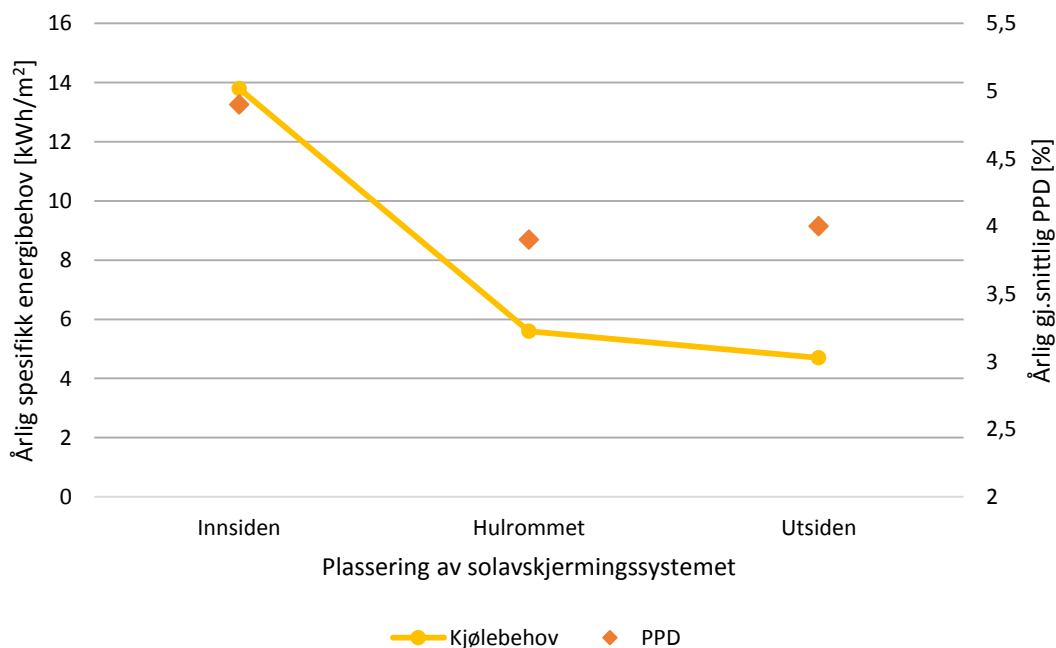
Den årlige gjennomsnittlige temperaturen vil i dobbelfasaden være høyest ved plassering av solavskjermingssystemet i hulrommet. Denne temperaturen er omtrent 7 % høyere ved plassering av solavskjermingen i hulrommet sammenlignet med plassering på utsiden av fasaden. Dette er et resultat som indikerer at varmen fra solinnstrålingen vil bli «fanget» i hulrommet, altså vil solstrålingen som treffer solavskjermingen reflekteres tilbake og varme opp den doble fasaden. Ved plassering på utsiden så klarer solavskjermingen å stenge solstrålingene ute før de når inn i hulrommet, og derfor vil også temperaturen i hulrommet ved utvendig plassering være lavest av de tre plasseringene slik som Figur 84 viser.

Stec og Paassen (2005) indikerer at fra et energiperspektiv er den verste innstalleringen av solavskjermingssystemet på innsiden av rommet. Dette vises også i Figur 84 hvor det totale energibehovet vil være høyest ved plassering av solavskjerming innvendig, omtrent 6 % høyere sammenlignet med å ha mellomliggende eller utvendig solavskjerming. Det er bare 0,1 kWh/m² som skiller det totale energibehovet ved utvendig og mellomliggende plassering.



Figur 85: Varmebehov og årlig gjennomsnittlig temperatur i Sone 1 ved ulike plasseringer av solavskjermingssystemet

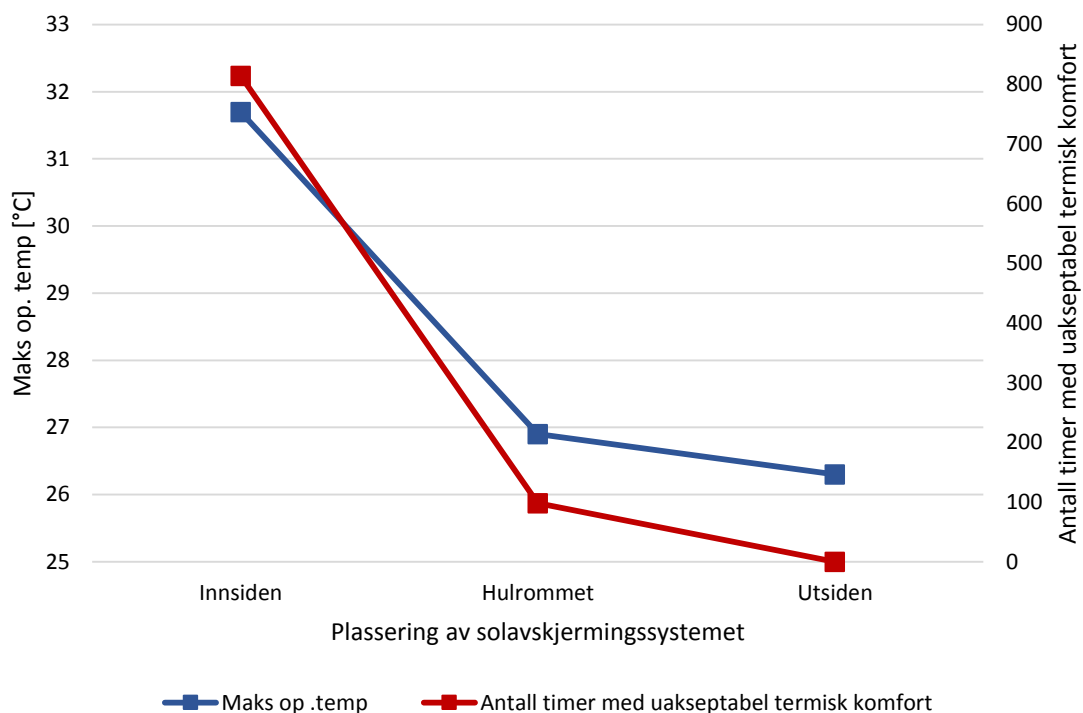
Figur 85 viser byggets varmebehov og årlig gjennomsnittlig temperatur i Sone 1 ved ulike plasseringer av solavskjermingssystemet. Varmebehovet for plassering av solavskjermingssystemet på innsiden vil være 14 % lavere enn plassering av solavskjermingssystemet i hulrommet, og 17 % lavere enn plassering på utsiden. Årsaken til det økte varmebehovet vil altså være på grunn av varmen som stenges ute fra bygget på vinterstid, og som dermed ikke vil kunne gi et positivt bidrag til energibehovet. Ved å se på den gjennomsnittlige operative temperaturen i Sone 1, kan en se at temperaturen på modellen som har solavskjermingen plassert på innsiden vil være omtrent 5 % høyere sammenlignet med de to andre plasseringene.



Figur 86: Kjølebehov og årlig gjennomsnittlig PPD i Sone 1 ved ulike plasseringer av solavskjermingssystemet

Figur 86 viser det spesifikke kjølebehovet og årlig gjennomsnittlig PPD i Sone 1 ved ulike plasseringer av solavskjermingssystemet. Her vises det tydelig at kjølebehovet blir redusert ved plassering av solavskjermingssystemet fra innerst til ytterst i den doble fasaden. Gedsø et al. (2013) poengterer at ved innvendig solavskjerming vil solenergien samles opp i solavskjermingen og at det dermed vil bli høye temperaturer på den innvendige flaten av avskjermingsanlegget. Dette vil kunne resultere i høyere kjølebehov sammenlignet med de to andre plasseringene. Fra figuren fremkommer dette tydelig da innvendig plassering gir hele 60 % og 67 % høyere kjølebehov sammenlignet med henholdsvis mellomliggende og utvendig plassering.

Den maksimale temperaturen samt antall timer med uakseptabel termisk komfort i Sone 1 vises i Figur 87 med ulike plasseringer av solavskjermingssystemet.



Figur 87: Maks operativ temperatur og antall timer med uakseptabel termisk komfort i Sone 1 ved ulike plasseringer av solavskjermingssystemet

Ved plassering av solavskjermingen enten i hulrommet eller på utsiden av den doble fasaden reduseres den maksimale operative temperaturen i Sone 1 med omtrent 18 %. Den varmen som har samlet seg opp i sonen ved innvendig solavskjerming forsvinner ikke fra rommet og må dermed fjernes med eget ventilasjonsanlegg. Den høye maksimale operative temperaturen vil kunne redusere den termiske komforten for de som oppholder seg i sonen. Dette vises i Figur 87 hvor antall timer med uakseptabel termisk komfort er på hele 814 timer ved innvendig plassering sammenlignet med mellomliggende og utvendig plassering som har henholdsvis bare 98 timer og 0 timer. Resultatene viser altså at energibehovet og den termiske komforten i bygget vil være sterkt avhengig av plasseringen av solavskjermingssystemet. Et mulig sparetiltak vil være å bruke innvendig plassering av solavskjermingssystemet på nordsiden av bygget som er preget av lavere temperaturer i sonene, og mellomliggende eller utvendig plassering på fasadene orientert mot sør, øst og vest.

9.4.6 Følsomhetsanalyse

Følsomhetsanalysen er utført for å studere hvordan en endring i bestemte parametere vil påvirke energibehovet og igjen inneklimate i bygningen. Det utføres dermed en dynamisk simulering for det optimale designet, og hvor kontorbygget med de ulike tiltak er implementert. Det er valgt å legge inn noen endringer i noen parametere i den doble fasaden for å se hvordan dette vil påvirke energibruken og inneklimate i kontorbygget.

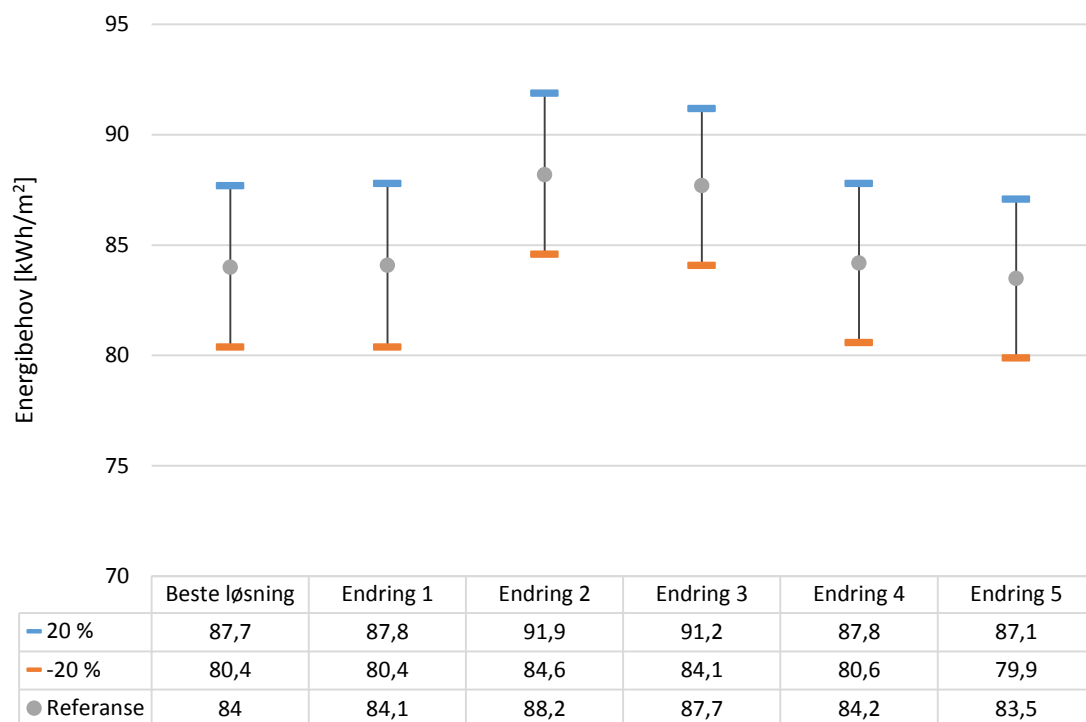
Endringene i den doble fasaden for følsomhetsanalysen er lagt frem i Tabell 28.

Tabell 28: Endringer i den doble fasaden for følsomhetsanalysen

Tiltak	
Endring 1	Åpning av vindu ut til den doble fasaden ved hjelp av reguleringen: Av/på-temperaturkontroll + tidsplan. Da åpnes vinduet med den andel og tidspunkt som angis i tidsplanen.
Endring 2	Mekanisk avtrekk i den doble fasaden, det er valgt å sette denne til 10 l/s hulrommet til den doble fasaden.
Endring 3	Den doble fasaden strekker seg ikke over hele fasaden, men bare over selve vinduet.
Endring 4	Solavskjermingen er automatisert og vil styres etter direkte solinnstråling. Når nivået på solinnstrålingen når 200 W/m ² går persiennene ned. Tanken er at man kanskje klarer å utnytte varmen fra solstrålingen bedre på vinterstid før solavskjermingen går ned.
Endring 5	Endre lamellvinkelen i solavskjermingssystemet fra 45° til 20°.

Det er valgt å se hvordan tiltakene endres, med fokus på energibruk og inneklimate, ved å endre U-verdien på det innerste glasset (vinduene) med $\pm 20\%$. Fra før av består den innerste glassfasaden av tre-lagsglass, med en U-verdi alene på 0,827 W/m²K. For å endre denne U-verdien med $\pm 20\%$ skal U-verdien være omtrent 0,99 W/m²K for + 20 %, og omtrent 0,66 W/m²K for – 20 %. For å få til dette ble det valgt å bruke samme glass men endre tykkelsen på argonfyllingen mellom glassene.

U-verdien på ytterfasaden er bare 5,27 W/m²K, da glasset er et ett-lags klart glass. Denne vil det ikke endres på da det ble sett i tidligere simulerte resultater at tre-lags glass innerst og ett-lags glass ytterst gav lavest energibruk. Derfor er det valgt å se hvordan energibruket og inneklimate endres ved endring av U-verdi på den innerste fasaden.

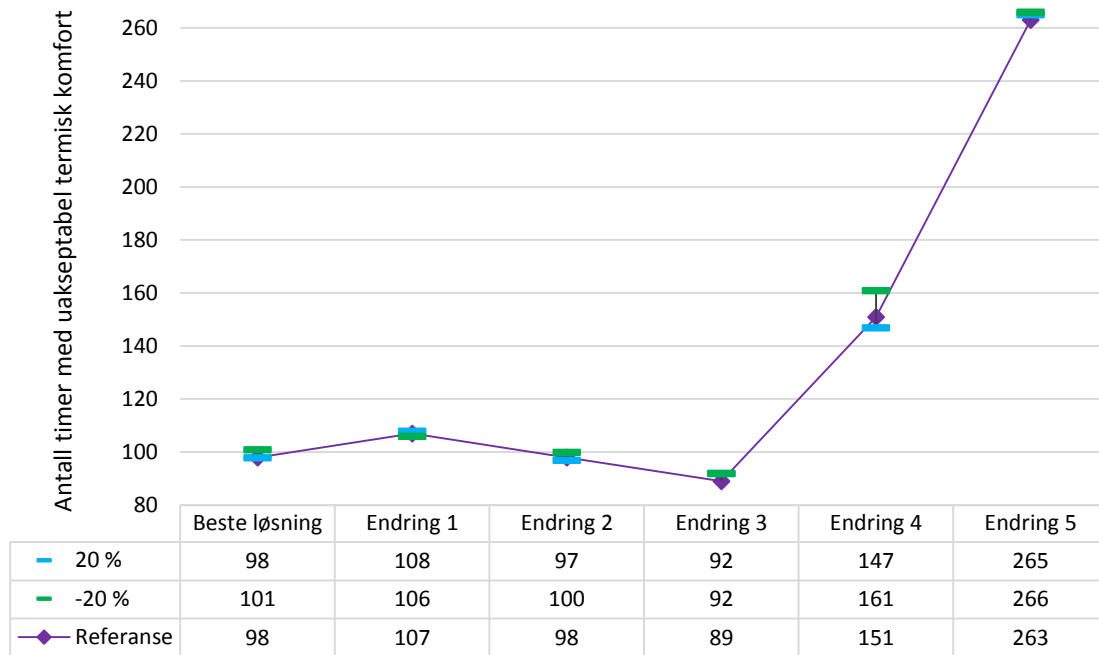


Figur 88: Energibehov for bygget med markering for endring i U-verdi på det innerste glasset i den doble fasaden på $\pm 20\%$

Figur 88 viser energibehovet til kontorbygget med markering for endring i U-verdi på det innerste glasset i den doble fasaden på $\pm 20\%$. Ved de valgte endringene for den doble fasaden viser det seg at også energibehovet i bygget endres. Dermed kan det antas som et viktig punkt at det gjøres simuleringer med ulike endringer i forskjellige parametere for å finne den doble fasaden som vil være optimal for et gitt bygg. Det spesifikke varme- og kjølebehovet vises i *VEDLEGG G.1 Følsomhetsanalyse*.

Resultatene viser at det totale energiforbruket øker med økt U-verdi, noe som vil si at energibehovet i et bygg er avhengig av U-verdien på den doble fasaden selv med implementert solavskjerming. For alle simuleringene øker energibehovet med rundt 4 % ved en økning i U-verdien på det innerste glasset på 20 %. En større endring i U-verdien ville gitt et enda større prosentvis økning eller reduksjon i energibehovet. Som tidligere resultater viste, vil bygget være enda mer avhengig av U-verdien i fasaden dersom det ikke er implementert solavskjerming, siden all solinnstråling vil treffe sonen istedenfor å bli stoppet av solavskjermingen. Endring 5, som endrer lamellvinkelen til 20° viser det laveste totale energibehovet for de ulike endringene, og er redusert med 0,5 kWh/m² per år sammenlignet med referansebygget. Det spesifikke varmebehovet er redusert med 4,2 % mens det spesifikke kjølebehovet har økt med 12,5 % i forhold til referansebygget.

Den termiske komforten i bygget vil også være avhengig av U-verdien, men siden U-verdien endres såpass lite, vil ikke den termiske komforten bli påvirket i særlig stor grad. Figur 89 viser antall timer med uakseptabel termisk komfort med ulike endringer i dobbelfasaden for følsomhetsanalysen. Endring 1, med regulering for å kunne åpne vinduet ut mot hulrommet, vil ikke være optimal, da den ikke tar hensyn til hva temperaturen i hulrommet er. Den ser på utetemperaturen når den bestemmer om vinduet skal åpnes og dermed vil det være flere ganger at vinduet åpnes når temperaturen i hulrommet er høyere enn sonetemperaturen. Dette forårsaker varm luft til å strømme inn i sonen og varme luften her opp ytterligere.



Figur 89: Antall timer med uakseptabel termisk komfort ved ulike endringer i dobbelfasaden for følsomhetsanalysen

Som det kan leses av Figur 89, vil endringen i lamellvinkelen på solavskjermingsystemet, Endring 5, forårsake det høyeste antall timer med uakseptabel termisk komfort, som er på 263 timer. På grunn av det høye kjølebehovet for denne endringen, som har økt med 12,5 % fra referansebygget, kan det antas at temperaturen i hulrommet påvirker den operative temperaturen i sonen slik at denne ligger på et gjennomsnittlig ukomfortabelt høyt nivå i sommermånedene. På grunn av den varme luften som vil strømme inn i sonene ved Endring 1, vil den maksimale operative temperaturen være høyest for denne endringen i Sone 1, som vist i Figur 90. Her vil man oppnå dager hvor den maksimale operative temperaturen blir forholdsvis høy.



Figur 90: Maks operativ temperatur for de ulike endringene i følsomhetsanalysen

9.5 Klimadataanalyse

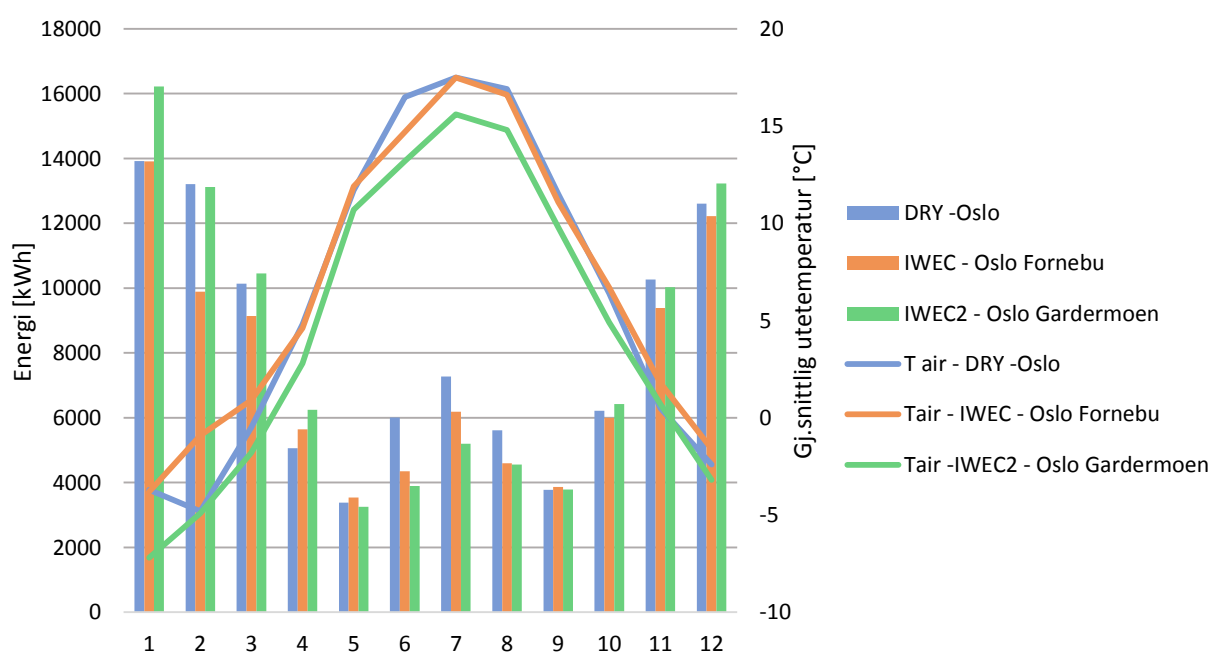
For å kunne få et overblikk om klimadata-sett vil ha noen innvirkning på energibruken, er det valgt å se på DRY-klima opp mot klimadataene som IDA ICE bruker, IWEC, samt SIMIEN sine klimafilene Meteo. Grunnen til at valget av klimafil til referansebygget ble DRY-klima er hovedsakelig fordi man vet at denne filen inneholder gode klimadata for stedene de er laget for i Norge. Det vil bli sett på den beste løsningen i dobbelfasaden når klimafilene skal analyseres. Sammenligning av filene viser at DRY-klimafil for Oslo, er lik Meteo-klimafil som brukes i SIMIEN for samme sted. Dette er ikke tilfellet for andre plasser i Norge, som for eksempel Bergen, så det er viktig å sjekke at dette stemmer ved simuleringer der klimafil spiller en viktig rolle. Dermed ble det valgt å sammenligne DRY-klimafil med IWEC- Fornebu samt IWEC2 - Gardermoen som passende filer for et Oslo-klima.

En sammenligning på spesifikt energibehov mellom simuleringen med DRY-klima-Oslo, IWEC-klima-Oslo Fornebu samt IWEC2-klima-Oslo Gardermoen vises i Tabell 29.

Tabell 29: Spesifikt energibehov for bygningen med beste løsning med forskjellig klimafil for Oslo

Spesifikt energibehov [kWh/m ²]			
	DRY-klima Oslo	IWEC-klima- Oslo Fornebu	IWEC2-klima-Oslo Gardermoen
Kjølebehov	5,6	2,9	1,9
Varmebehov	38,5	34,7	41,9
Total energibehov	84	76,1	83,2

Bygningens kjølebehov reduseres for både IWEC- og IWEC2 klimafilene. IWEC Fornebu gir den laveste totale energibehovet i bygningen, da varmebehovet er mindre enn for de to andre klimafilene. Som Figur 91 viser er det også denne klimafil som opererer med de høyeste temperaturene på vinteren. IWEC2-klimafil vil gi kontorbygget det største varmebehovet sammenlignet med DRY- og IWEC- filen. En påvirkende faktor til dette varmebehovet er at denne klimafil opererer med de laveste temperaturene på vinteren.

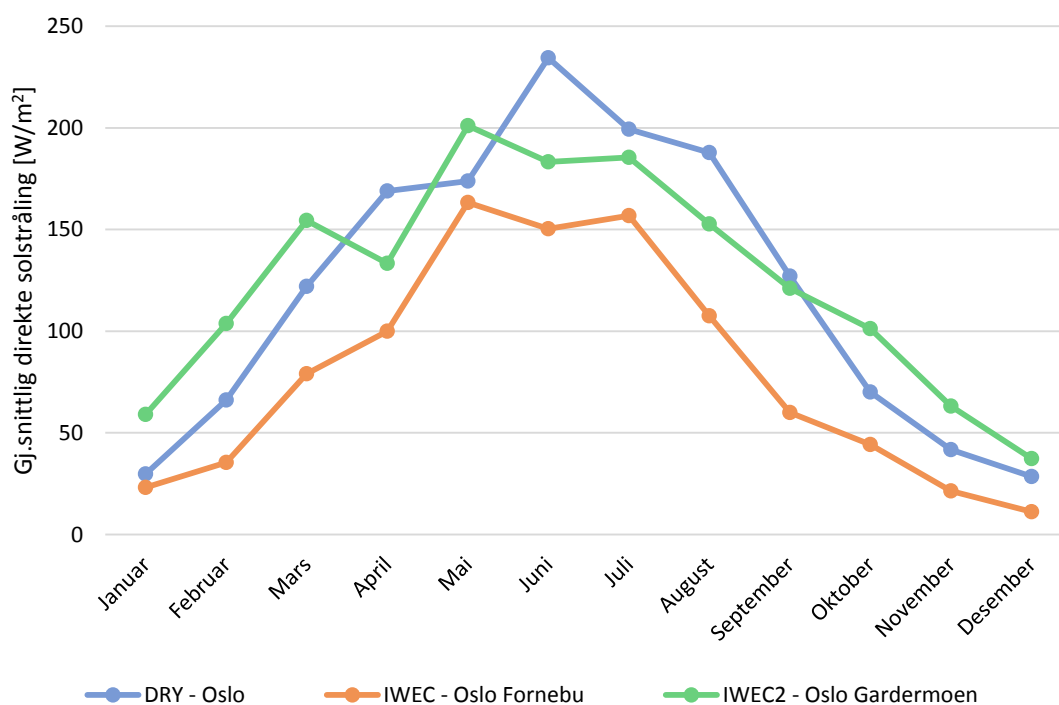


Figur 91: Månedlig energibehov og gjennomsnittlig utetemperatur for den beste løsningen med forskjellig klimadata, DRY, IWEC og IWEC2

Figur 91 viser det totale energibehovet for en og samme bygning, bare simulert med ulike klimafilene. Som det kan leses ut fra figuren vil utetemperaturer i klimafilene være en påvirkende faktor for energibehovet. IWEC2-filen har i gjennomsnitt lavere utetemperatur gjennom året sammenlignet med DRY- og IWEC-filene. Dette gjør at kjølebehovet i sommermånedene vil være mindre for IWEC2-filen mens det derimot vil gi større varmebehov vinterstid. Desto kaldere inntakstemperaturen til ventilasjonsaggregatet er, desto større vil energibehovet for varmebatteriet om vinteren være for å opprettholde konstant tilførselstemperatur til sonene. Dette vil kunne føre til at energibehovet også blir større. Når det er kaldere ute vil det også forekomme en større andel varmetransport gjennom den doble fasaden og dermed vil varmebehovet i sonene øke.

Ved en sammenligning av DRY-klimafilene og IWEC-klimafilene vil det spesifikke energibehovet ha en forskjell på omtrent 10 %, mens det spesifikke varmebehovet og kjølebehovet har en omtrentlig forskjell på henholdsvis 10 % og 50 %. Som Tabell 29 viser vil den største forskjellen i de tre klimafilene være det spesifikke kjølebehovet mellom DRY- og IWEC2- klimafilene, som er på hele 65 %. Ved å se sammenhengen til den gjennomsnittlige utetemperaturer, er det DRY-klimafilene som også opererer med høyest temperatur på sommeren. Sammenlignet med DRY-klimafilene har IWEC2-klimafilene en gjennomsnittlig temperatur som er omtrent 11 % lavere i juli måned. Ved i tillegg å se på den månedlige gjennomsnittlige solstrålingen i Figur 92 er det DRY-klimafilene som har den høyeste gjennomsnittlige solstrålingen den måneden. Altså vil det være sammenheng i flere klimaparametere når man ser på energibehovet i en bygning

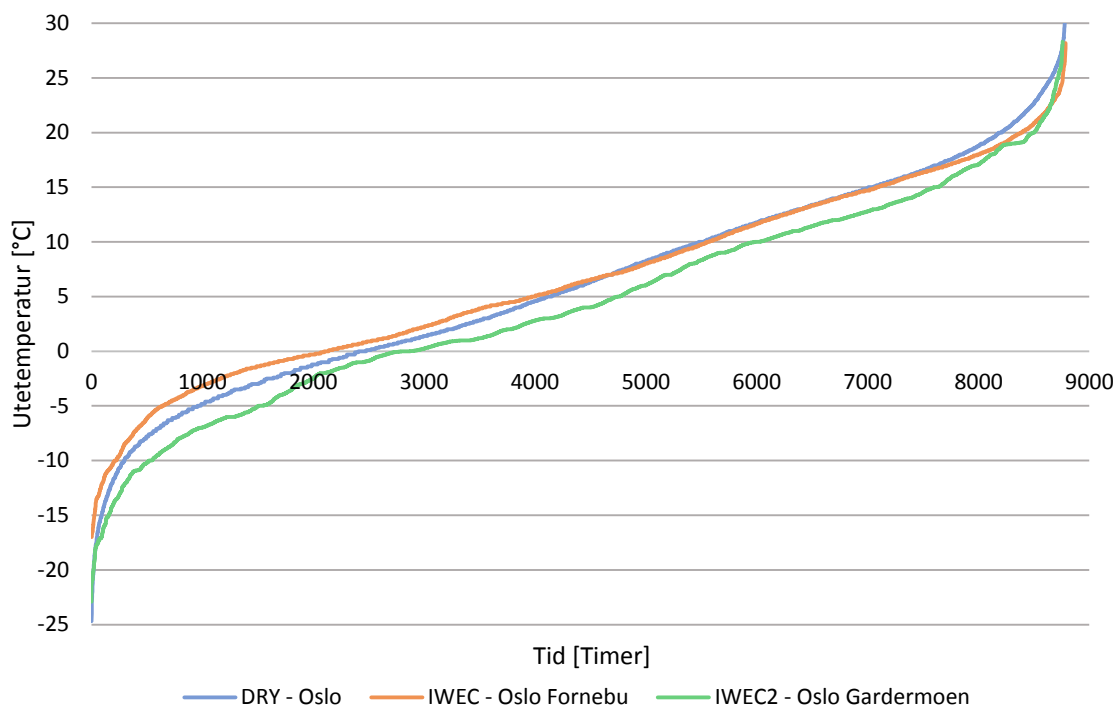
Figur 92 viser den gjennomsnittlige direkte solstrålingen per måned for de tre ulike klimafilene.



Figur 92: Gjennomsnittlig direkte solstråling for de forskjellige klimadataene, DRY, IWEC og IWEC2

Som man kan se på figuren over, vil den direkte solinnstrålingen fra de tre filene kunne variere ganske mye. Solinnstrålingen er mye høyere i sommermånedene ved DRY-klima enn for IWEC- og IWEC2-klimaet.

Figur 93 viser varighetsdiagrammet for utetemperaturer for de ulike klimafilene for Oslo, DRY, IWEC og IWEC2.



Figur 93: Temperaturdifferanse for de ulike klimafilene for Oslo

Som figuren viser ligger utetemperaturen for IWEC2-klimaet i gjennomsnitt lavere enn DRY-klimaet, og dette vil som tidligere vist påvirke energibehovet. IWEC-filen har i gjennomsnitt høyere utetemperatur i vintermånedene mens den om sommeren har noenlunde lik temperatur som DRY-klimafilene.

Innvirkning på det termiske miljøet ved ulike klimafilene for samme plass

Hvordan de forskjellige klimafilene påvirker innemiljøet kan sees i Tabell 30. Den termiske komforten hvor det er uakseptabel PMV og PPD verdi reduseres fra 3 % til 2 % ved bruk av IWEC- klimafil.

Tabell 30: Termisk komfort, Sone 1

Sone 1	Prosentvis tid av okkuperte timer		
	DRY-klima Oslo	IWEC-klima- Oslo Fornebu	IWEC2-klima-Oslo Gardermoen
I – Best	79 %	82 %	83 %
II – Bra	89 %	92 %	92 %
III – Akseptabelt	97 %	98 %	97 %
IV - Uakseptabelt	3 %	2 %	3 %

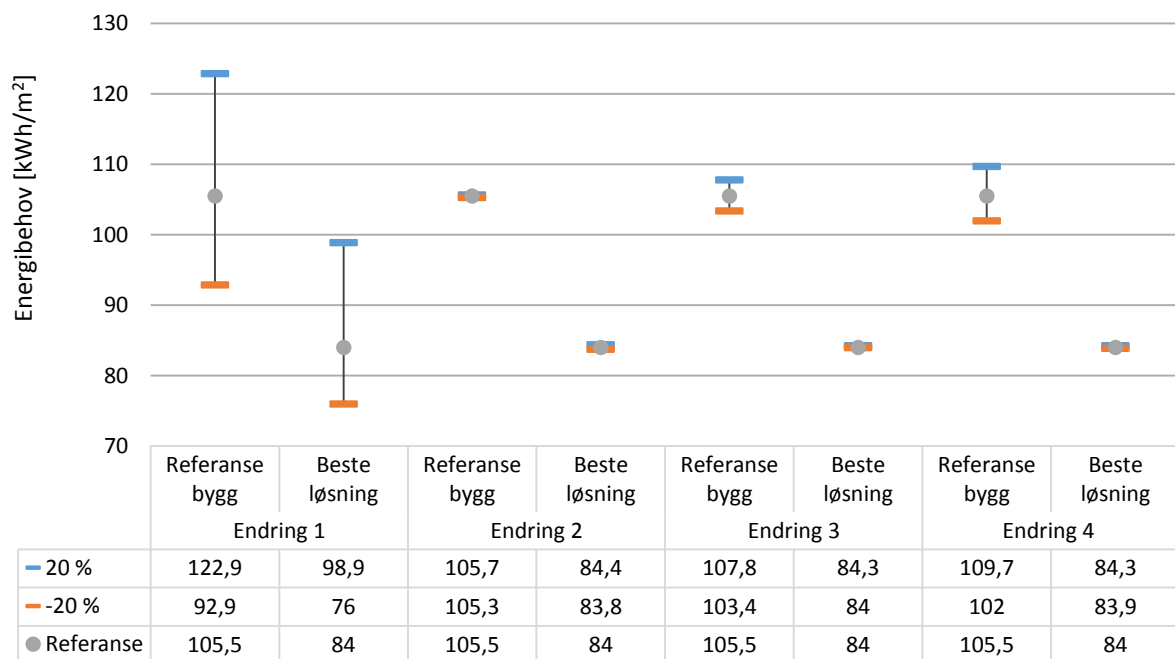
Årsaken til endringen i den termiske komforten i sonen vil være forskjellen i de ulike parameterne i klimafilene. Eksakt hvilke parametere i klimafilene som spiller den viktigste rollen for endringene i resultatene vil det bli sett nærmere på i neste delkapittel 9.5.1 Endring i parametere i DRY-klimafilene. Her vil de ulike parameterne justeres for å se hvilken parameter som påvirker energibehovet og den termiske komforten aller mest. Likevel kan en ut fra resultatene i dette delkapittelet se at valget av klimafil vil kunne påvirke energibehovet og den termiske komforten i bygget.

9.5.1 Endring i parametere i DRY-klimafilen

Det er valgt å se enda nærmere på den DRY-klimafilen for Oslo som ble brukt for de ulike scenarioene. For å sjekke hvordan energibruken og inneklimaet vil bli påvirket ved å bruke feil klimafil i energisimuleringer er det valgt å justere de enkelte parametere i klimafilen med $\pm 20\%$. Det er valgt å se nærmere på disse endringene:

- Endring 1: Endre temperatur $\pm 20\%$
- Endring 2: Endre vindhastighet $\pm 20\%$
- Endring 3: Endre diffus solstråling $\pm 20\%$
- Endring 4: Endre direkte normal solstråling $\pm 20\%$

Figur 94 viser det spesifikke energibehovet for referansebygget og den beste løsningen ved de ulike endringene i DRY-klimafilen.

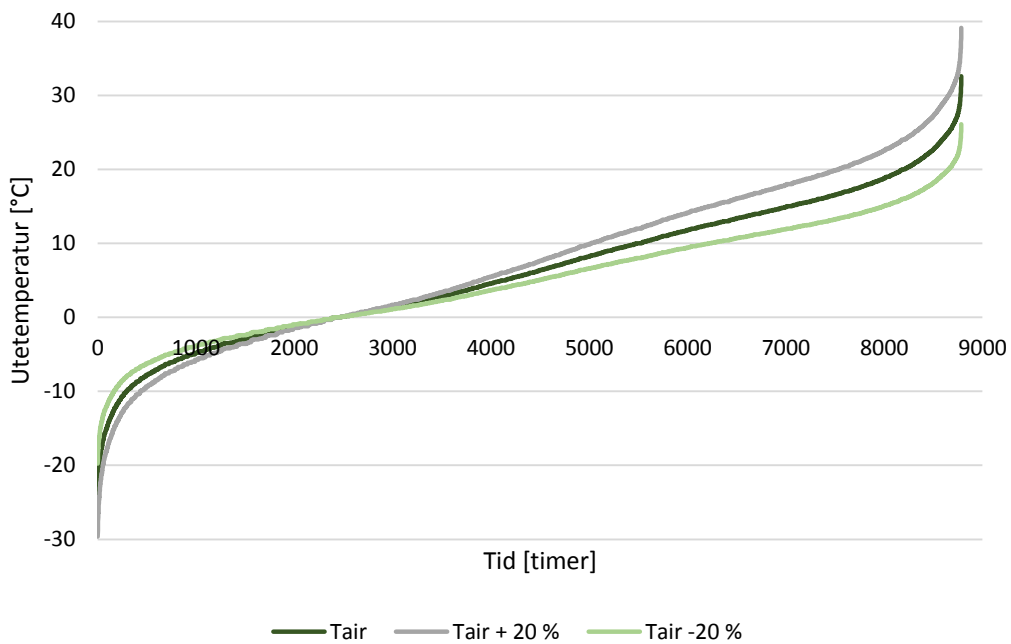


Figur 94: Energibehovet ved endringer på $\pm 20\%$ i referansebygget og den beste løsningen på dobbelfasaden

Som figuren illustrerer er det endringen i temperatur som vil kunne gi det største utslaget for energibehovet i kontorbygget. En økning på 20% i temperaturen gir en økning i energibehovet på omtrent 15% for «beste løsning». Energibehovet vil altså variere med utetemperaturen og dermed vil det være viktig at klimafilene gir et omtrent riktig forhold for hvordan temperaturen vil kunne variere over et år for plasseringen av bygget. Endring 2, altså en endring på $\pm 20\%$ i vindhastighet, var den endringen som gav lavest variasjon i energibehovet, og det kan dermed antas at vindhastigheten ikke vil være en faktor som påvirker energibehovet i større grad. Det spesifikke varme- og kjølebehovet vises i VEDLEGG G.2 Klimadataanalyse.

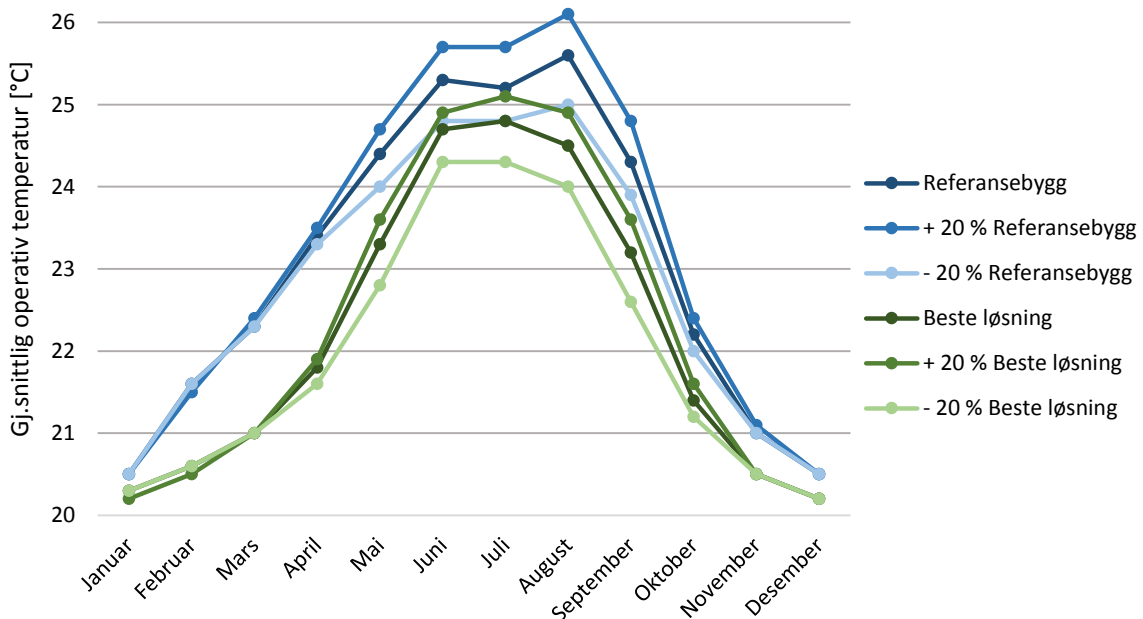
Figuren viser at en endring solinnstrålingen vil ha lite å si for energibehovet i bygningen dersom den har et solavskjermingssystem, slik som modellen med beste løsning har. Det viser at det er viktig å forbedre fasaden i et bygg slik at det vil fungere optimalt ved ulike forhold. Siden det er endringen i temperaturen som vil ha størst påvirkning på energibruket, er det valgt å se nærmere på hvordan denne endringen vil kunne påvirke inneklimaet i bygningen. Det er her fortsatt valgt å se nærmere på Sone 1 når det skal sees nærmere på termisk komfort, da man her kan se på det «verste» tilfellet i bygningen.

Figur 95 viser temperaturdifferansen ved endring av utetemperatur med $\pm 20\%$.



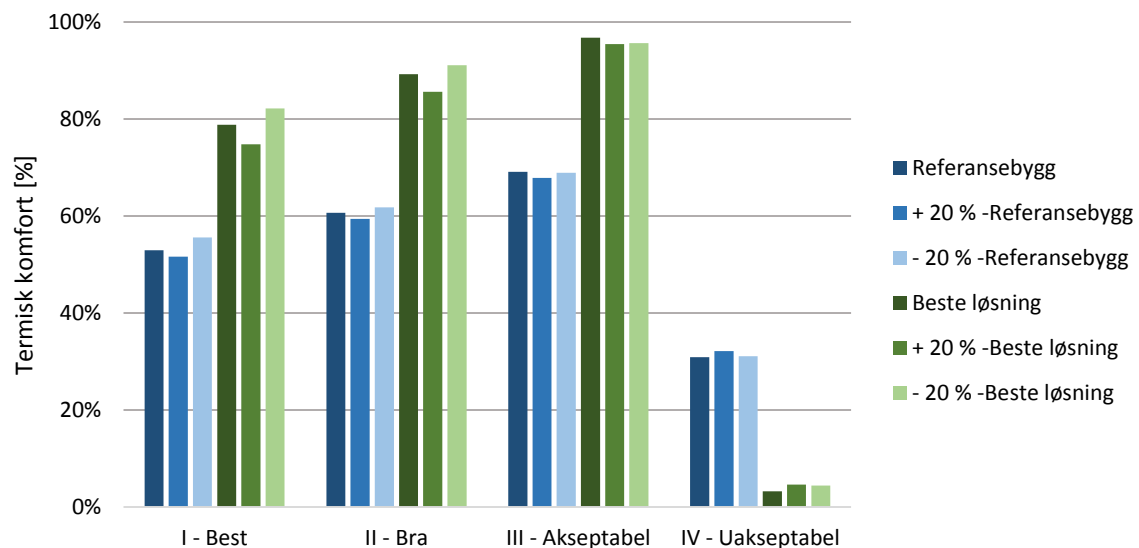
Figur 95: Temperaturdifferanse med endring i utetemperatur på $\pm 20\%$

Som figuren viser vil en endring på $\pm 20\%$ på utetemperaturen gi en markant forskjell i hvor temperaturnivået på grafen ligger. En endring på $+ 20\%$ i temperaturen vil gi lavere temperaturer på vinteren og høyere temperaturer på sommer, og dette vil påvirke både den termiske komforten og energibehovet i bygget. Ved en endring i utetemperaturen vil den operative temperaturen i kontorbygget bli påvirket. Dette vises i Figur 96, hvor den gjennomsnittlige temperaturen både for referansebygget og for «beste løsning» endrer seg med en økning eller reduisering i temperaturen.



Figur 96: Gjennomsnittlig operativ temperatur i Sone 1, ved endring av temperaturen $\pm 20\%$ i klimafilen

Den operative temperaturen i Sone 1, for begge byggene, vil bli påvirket av en endring i utetemperatur. Den høyeste endringen i den gjennomsnittlige operative temperaturen vil være på omtrent 5 % for begge modellene. Hvordan en endring på $\pm 20\%$ i temperaturen i klimafilen påvirker innemiljøet i Sone 1 kan sees i Figur 97. Den termiske komforten hvor det er uakseptabel PMV- og PPD-verdi øker fra 3% til henholdsvis 5 % og 4 % ved en endring på $\pm 20\%$ i temperaturen for modellen med den beste løsningen på den doble fasaden. Ved en reduisering av utetemperatur på 20 % vil andelen prosent for termisk komfort innenfor kategorien «best» øke med 3 % for begge modellene.



Figur 97: Termisk komfort i Sone 1, ved endring av temperatur $\pm 20\%$ i DRY-klimafilen

Resultatene her viser at dersom klimafilene har forskjellige utetemperaturen vil dette kunne påvirke den termiske miljøet og energibehovet i bygget. Det resulterer dermed i at utetemperatur vil være en påvirkende faktor og vil derfor kunne være avgjørende når det skal velges riktige klimafilene.

10 Diskusjon og oppsummering

Referansebygget som store deler av denne oppgaven er basert på, er bygd som et kontorbygg med dobbelfasade. Bygningen er konstruert på grunnlag av statistiske data, standardverdier i NS 3031 og passivhusstandarden NS 3701. Hensikten er å finne ut hvordan en dobbelfasade påvirker energibehovet og det termiske inneklimaet i bygget. Den valgte simuleringsmetodikken går ut på å simulere de mest kritiske parameterne som ble funnet i litteraturstudien. Videre ble de endringene i referansebygget som gav de beste resultatene, med hensyn på energibruk og inneklima, brukt til å lage en modell med en forbedret dobbelfasade som ble referert til som «Beste løsning».

IDA ICE-programmet krever at det gjøres en del forarbeid før man kan begynne å simulere, da det er mange implementeringer av ulike parametere som er nødvendig for at simuleringen skal kunne gi et nøyaktig nok resultat. Ettersom beregningene i denne oppgaven kun er basert på endringer i den doble fasaden slik som beskrevet innledningsvis, må det tas høyde for at andre implementeringer i selve driften, endringer i andre parametere eller materialer i bygget også vil kunne få konsekvenser for energibehovet og inneklimaet. De mest kritiske parameterne som ble funnet i analysen med referansebygget var implementering og plassering av solavskjermingssystemet, U-verdien på den doble fasaden og om hulrommet var åpent eller lukket til omgivelsene. Det totale spesifikke energiforbruket til referansebygningen var på 105,5 kWh/m², mens det for modellen med «beste løsning» ble redusert til 84 kWh/m². Det ble dermed vist at det var mulig å nå kravet som var satt i passivhusstandarden, som vist i Figur 1, ved å gjøre analyse av hvilke endringer som påvirker energibehovet og inneklimaet mest.

Som sett i *delkapittel 9.1.1 Referansebygget med og uten dobbelfasade*, gav referansebygget med den doble fasaden bedre inneklima sammenlignet med den enkle fasaden med nesten lik U-verdi. Grunnen til dette kan være at den doble fasaden fungerer som et ekstra isolerende lag som kan stenge ute varmen på sommerstid. I tillegg var den totale g-verdien på den doble fasaden mindre for referansebygget enn i Scenario 0-1 og 0-2, og dermed vil mindre solstråling slippe igjennom. Den operative temperaturen i referansebygget lå gjennomsnittlig på en lavere temperatur gjennom året, og som igjen økte den termiske komforten i kontorbygget. Selv om det spesifikke totale energibehovet ikke ble endret drastisk i disse scenarioene var det åpenlyst at sammenligningen med nesten samme U-verdi, både med og uten den doble fasaden, så hadde den doble fasaden mindre kjølebehov enn den vanlige fasaden. Kjølebehovet i referansebygget med den doble fasaden ble omtrent 32 % lavere sammenlignet med Scenario 0-1 og nesten 22 % lavere sammenlignet med Scenario 0-2. Referansebygget hadde 33 % uakseptabel PMV og PPD verdier under driftstid, mens tilfellene uten den doble fasaden hadde økt til 37 % og 35 % for henholdsvis Scenario 0-1 og 0-2. En av grunnene til de økte uakseptable PMV- og PPD-verdiene kan være den økte operative temperaturen i sonene. Resultatene fra simuleringene med referansebygget viser klart at den ekstra glassfasaden ved bruk av dobbelfasade vil redusere dagslyset i sonene innenfor. I simuleringene gjort mellom referansebygget og Scenario 0-1, hvor den ytre glassfasaden er lagt til i referansebygget, ble dagslysforholdene gjennomsnittlig over året redusert med 40 % i Sone 1.

Scenario 1 viste at ved å bruke tre-lags glass innerst og et ett-lags glass ytterst ble det totale energibehovet redusert sammenlignet med dobbelglass både innerst og ytterst. En mulig årsak til dette kan være at mye av solinnstrålingen vil hindres i å komme inn i hulrommet på grunn av dobbelglass i ytterfasaden. Dobbeltglasset i ytterfasaden vil ha en bedre U-verdi sammenlignet med et enkeltglass. Dette gjør at den operative temperaturen i sonen innenfor vil reduseres. Dobbeltglasset vil også stenge mer solinnstråling ute på vinterstid, og dermed vil ikke hulrommet varmes opp slik at det kan utnyttes som en termisk buffer på samme måte som ved bruk av enkeltglass ytterst. Resultatene viste altså at bruk av dobbelglass i ytterfasaden vil øke varmebehovet

på vinterstid. Scenario 1-4, som hadde tre-lagsglass innerst og ett-lagsglass ytterst med en U-verdi på $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, gav en reduksjon i det totale energibehovet på 16 % sammenlignet med referansebygget. Den største delen av energisparingen for scenarioet var i reduseringen av varmebehovet, som var på hele 22 %.

Scenario 2 og 3 så på størrelsen på åpningene mellom hulrommet og omgivelsene og dybden på hulrommet. Det ble valgt å anta at dybden på hulrommet ikke ville påvirke verken energibehovet eller den termiske komforten i bygget, da det ikke forekom noen som helst endring i resultatet i løpet av simuleringene sammenlignet med referansebygget. Simuleringene viste at den gjennomsnittlige volumstrømmen per år øker med åpningsarealet, mens den gjennomsnittlige temperaturen i hulrommet per år reduseres med økende volumstrøm. Det kan dermed antas at en større volumstrøm vil klare å transportere bort en større del av varmen fra hulrommet sammenlignet med mindre volumstrøm. Varmebehovet i bygget øker om vinteren ved økende størrelse på åpningene. Det kan antas at den isolerende effekten ved stor åpning vil være dårligere enn for en mindre åpning. Bakgrunnen for denne antakelsen er at et mindre åpningsareal vil holde lengre på luften i hulrommet sammenlignet med et større åpningsareal siden luftvekslingen per time ble redusert. Dermed vil luften ha lengre tid til å varmes opp i hulrommet, som igjen kan føre til økt temperatur av luften her. Det ble også sett på en simulering hvor hulrommet var helt lukket fra omgivelsene i vintermånedene, hvor den doble fasaden fungerte som en lukket statisk buffer. Resultatene viste at energibehovet og innklimaet ble bedre for modellen med den forbedrede dobbelfasaden. Det lukkede hulrommet fikk en større isolerende effekt på konstruksjonen og dermed fungerte den doble fasaden som en termisk buffer. Varmebehovet for kontorbygget ble altså redusert dersom hulrommet var lukket. Gjennomsnittlig ble varmebehovet her redusert med omtrent 9 % de fire første månedene. Dersom hulrommet er lukket på sommerstid vil det føre til overopphetning og høye temperaturer i den doble fasaden, og dette vil da ikke være ønskelig på grunn av det reduserte termiske klimaet i sonene i bygget. På bakgrunn av resultatene som ble funnet i delkapittelet med bruk av manuelle åpninger kan det tenkes at årlig energibehov samt termisk komfort vil kunne forbedres ved å stenge hulrommet i vintermånedene og åpne hulrommet i sommermånedene. En optimal situasjon ville være å ha en regulering på åpningene som endret størrelsen etter behovet og temperaturen i hulrommet og utetemperaturen.

Det ble også sett på hvordan temperaturen i hulrommet forandret seg med utetemperaturen. Δt mellom temperaturen i hulrommet og utetemperaturen var generelt liten gjennom simuleringene, sett bort fra dersom hulrommet var lukket. For referansebygget viste det seg at Δt mellom hulrommet og utetemperaturen var mindre enn for modellen med forbedret dobbelfasade. En årsak til dette kan være fordi solavskjermingssystemet i modellen med den beste løsningen «fanget» varmen fra solinnstrålingen i hulrommet, til forskjell fra referansebygget hvor solinnstrålingen nesten direkte ble overført til rommet på innsiden av den doble fasaden. I tillegg er høyden på hulrommet bare 2,9 m, og det kan antas at mye av varmen kunne bli transportert ut av den doble fasaden med volumstrømmen, slik at temperaturen her vil ligne mer på utetemperaturen. Det ble gjort en forenklet beregning på volumstrømmen i hulrommet, hvor forskjellen mellom den beregnede og den volumstrømmen som IDA ICE gav, for en bestemt dag og tidspunkt, var på omtrent 5 %. At de ikke ble helt like kan skyldes at IDA ICE tar hensyn til vindhastigheten som treffer fasaden mens dette ikke ble tatt hensyn til i de forenklete beregningene.

Simuleringene viste at implementering og plassering av et solavskjermingssystem er viktig for å oppnå lavere kjølebehov og forbedret innklima. Solavskjermingssystemet ga en betydelig forbedring av den termiske komforten i bygget, men var avhengig av plasseringen på solavskjermingssystemet. Resultatene viser tydelig at bruk av solavskjerming i hulrommet og på utsiden av den doble fasaden

gir lavest kjølebehov med en reduksjon på henholdsvis 64 % og 75 % sammenlignet med ingen solavskjerming i referansebygget. Ved utvendig plassering vil den absorberte varmen fra solstrålingen forsvinne til omgivelsene mens den ved mellomliggende plassering vil kunne varme opp temperaturen i hulrommet. Ved plassering av solavskjermingen for den forbedrede dobbelfasaden enten i hulrommet eller på utsiden av den doble fasaden reduserte den maksimale operative temperaturen i Sone 1 med omtrent 18 % sammenlignet med innvendig solavskjerming. For innvendig solavskjerming vil varmen fra solstrålingen trenge inn gjennom den doble fasaden og solenergien vil samles opp i solavskjermingen, slik at det forekommer høye temperaturer på den innvendige flaten. Innvendig solavskjerming gav en betydelig lengre periode med operativ temperatur over 25 °C for den forbedrede løsningen sammenlignet med mellomliggende og utvendig plassering av solavskjermingssystemet. Grunnen til dette er at ved innvendig solavskjerming så må glassets solfaktor være svært lav for å oppnå samme skjermingseffekt som utvendig eller mellomliggende solavskjerming. Innvendig solavskjerming forbedrer i svært liten grad g-verdi, dette vises i *VEDLEGG F. Solavskjerming i modellen med beste løsning på den doble fasaden*. Den høye maksimale operative temperaturen vil redusere den termiske komforten for de som oppholder seg i sonen. Sammenlignet med referansebygget, som ikke har implementert solavskjerming, så vil forbedringen i antall timer med uakseptabel termisk komfort være redusert med henholdsvis 75 % og 95 % for mellomliggende og utvendig plassering. Resultatene viste også tydelig at dagslysnivået i sonene vil være påvirket av både implementering og plasseringen av solavskjermingssystemet. Ved å se på sommermånedene vil utvendig og mellomliggende plassering ha redusert dagslysnivået med 76 % sammenlignet med referansebygget som ikke har solavskjermingssystem. For bygg med dobbelfasade vil det altså være ekstra kritisk og nødvendig å finne en løsning som gir balanse mellom solavskjerming og dagslys.

Resultatene viser at et stort glassareal vil kunne gi økt utnyttelse av dagslys, bedre utsyn og økt visuell komfort. Samtidig vil et stort glassareal trenge større energibehov for å opprettholde tilfredsstillende termisk komfort i sonene. Det ble gjort en simulering med modellen med forbedret dobbelfasade hvor vindusarealet økte fra 15 % til 35 % av BRA, hvor resultatene viste at det totale energibehovet i bygget økte med økt vindusareal. Hovedårsaken er at mye varme går tapt ved store vindusareal som har en mye dårligere varmemotstand enn selve bygningskroppen. Modellen hadde en økning på omtrent 18 % i energibehovet fra minste til største vindusareal, og årlig utgjorde dette en økning på 15,7 kWh/m². En kan dermed si at det totale vindusarealet vil kunne spille inn på energibehovet i en bygning.

En klimafil—analyse hvor det ble sett på forskjellige klimafilere for samme sted viste at det kan forekomme store endringer i energibehovet i en bygning. På det meste gav det spesifikke energibehovet en forskjell på nesten 10 % ved to ulike klimafil-simuleringer for samme bygg. Det ble dermed gjort en analyse på endringen i ulike parametere i DRY-klimafilere for å finne ut hvilke parametere som ville påvirke energibehovet og inneklimate i kontorbygget mest. En endring i utetemperaturen gav det største utslaget for energibehovet i kontorbygget. En økning på 20 % i temperaturen gav en økning i energibehovet på omtrent 15 % for modellen. Den termiske komforten hvor det er uakseptabel PMV- og PPD-verdi øker fra 3 % til henholdsvis 5 % og 4 % ved en endring på ± 20 % i temperaturen. Energibehovet og inneklimate vil altså variere med utetemperaturen og dermed vil det være viktig at klimafilene gir et omtrent riktig forhold for hvordan temperaturen vil kunne variere over et år for plasseringen av bygget. I dag finnes det kun såkalte «design reference years» for Oslo, Bergen og Andøya, og det vil være nødvendig å utarbeide klimadata for flere steder. Når energi- og inneklimateberegninger blir utført bør disse beregningene skje ved samme type klimafil. Selv med gode klimadata sett for ulike steder, vil utformingen av bygget måtte ta hensyn til byggets plassering i forhold til terreng, skygger, og orientering.

11 Konklusjon

Referansemodellen er bygd opp som et kontorbygg hvor konstruksjonen er bygd etter passivhusstandarden. Simuleringene ble utført i simuleringprogrammet IDA ICE med ulike endringer i den doble fasaden. Videre i oppgaven ble de endringene i referansebygget som gav de beste resultatene, med hensyn på energibruk og inneklime, brukt til å lage en modell med en forbedret dobbelfasade. Ved bruk av dobbelfasade vil store deler av bygget være dekket av glass. Det er viktig at bruk og oppbyggingen av en dobbelfasade gjøres riktig siden glass har langt dårligere egenskaper enn ordinære veggkonstruksjoner når det gjelder varmetransmisjon. Hver energisimulering er basert på termodynamiske ligninger, prinsipper og forutsetninger. Dersom visse forutsetninger eller inndata i simuleringprogrammet ikke er korrekt, vil dette kunne forårsake unøyaktige resultater. Det er flere aspekter som må vurderes dersom en dobbelfasade skal implementeres, og fortsatt mangler det en del kunnskap om gjennomføring og erfaring på området.

Ved sammenligning av referansebygget med og uten den doble fasaden men med nesten lik U-verdi, viser resultatene at referansebygget med den doble fasaden vil oppnå bedre inneklime enn med en enkeltfasade. Forskjellen i det totale spesifikke energibehovet på en dobbelfasade og en enkeltfasade, med samme U-verdi på glassene, var forholdsvis liten. Selv om energibehovet ikke ble endret drastisk, kan resultatene konkludere med at med nesten samme U-verdi, både med og uten den doble fasaden, vil den doble fasaden ha lavere kjølebehov enn den vanlige fasaden har. Kjølebehovet i referansebygget med den doble fasaden var omtrent 22 % lavere sammenlignet med en enkelt fasade med omtrent samme U-verdi. Resultatene fra simuleringene med referansebygget viser også klart at den ekstra glassfasaden ved bruk av dobbelfasade vil redusere dagslyset i sonene innenfor. I simuleringene gjort mellom referansebygget og en enkeltfasade, vil dagslysforholdene gjennomsnittlig over året gi en reduksjon på omtrent 40 % i en sone vendt mot sør.

En kan konkludere med at det totale vindusarealet vil være en medvirkende faktor på energibehovet i en bygning. Resultatene viste at økende vindusareal også økte energibehovet og reduserte den termiske komforten i bygget. Hovedårsaken er at mye varme går tapt ved store vindusareal som har dårligere varmemotstand enn selve bygningskroppen. Det er viktig å huske at alle klimaparameterne vil kunne påvirke både temperatur, volumstrøm og lufthastigheten i den doble fasaden. Enkelte dager hvor det er mye sol, men lite vind, vil den påvirkende faktoren for oppdrift i hulrommet være temperaturforskjellen mellom inne og ute. I sommermånedene vil naturlig ventilasjon skje ved at uteluft kommer inn i de nedre åpningene, absorberer varme i hulrommet og blir deretter fjernet ved åpninger øverst i den doble fasaden. I vintermånedene viser resultatene at for å øke den termiske komforten samt redusere varmebehovet vil det være mest effektivt med et lukket hulrom slik at den doble fasaden kan fungere som en termisk buffer. For modellen med den forbedrede løsningen på dobbelfasaden var det gjennomsnittlig varmebehovet redusert med omtrent 9 % de fire første månedene i året dersom hulrommet var lukket sammenlignet med en åpning på 5 % av glassarealet. Ved høye temperaturer utendørs, vil det være fare for veldig høye temperaturer i hulrommet ved lukket hulrom. Resultatene viste at det i en varmeperiode i slutten av mars kunne oppstå temperaturer på hele 45-60 °C i hulrommet. En konsekvens av dette er overopphetning av sonen innenfor dobbelfasaden da mye varme vil overføres gjennom fasaden og glassarealet. Det kan dermed konkluderes med at både energibehovet og det termiske inneklimate i sonene påvirkes av temperaturen som forekommer i hulrommet.

Det ble observert at U-verdien på glassene samt antall glass i indre og ytre fasade hadde betydning for inneklime og energibruk. Ved dårlig U-verdi, ble den operative temperaturen på dager med mye solstråling veldig høy i sonene, spesielt i sonene med vindu som vender mot sør. Uten solavskjerming ble temperaturene i rommene veldig høy, noe som førte til å kjølebehovet i modellen ble større. Det

vil derfor være nødvendig å implementere solavskjerming for å unngå overtemperaturer og blanding. For plasseringen av solavskjermingen vil det beste alternativet, ut fra simuleringene i denne oppgaven, være å plassere solavskjermingssystemet i hulrommet. Innvendig plassering gav høye operative temperaturer som gjorde at sonene hadde fare for overopphetning. Her vil varmen fra solstrålingen trenge inn gjennom den doble fasaden og solenergien samles opp i solavskjermingen, slik at det forekommer høye temperaturer på den innvendige flaten av avskjermingsanlegget. Ved utvendig plassering ble kjølebehovet redusert enda mer, mens varmebehovet økte. Årsaken til det økte varmebehovet vil være varmen som stenges ute fra bygget på vinterstid, og som dermed ikke vil kunne gi et positivt bidrag til energibehovet. For modellen med den forbedrede dobbelfasaden gav innvendig plassering hele 60 % og 67 % større kjølebehov sammenlignet med henholdsvis mellomliggende og utvendig plassering. Her var antall timer med uakseptabel termisk komfort på hele 814 timer ved innvendig plassering sammenlignet med mellomliggende og utvendig plassering som har henholdsvis bare 98 timer og 0 timer. Solavskjermingssystemet påvirker altså dagslys, termisk komfort og energi. Hovedfunksjonene til solavskjermingssystemet skal være å kontrollere lufttemperatur, skjerme mot direkte soldisponering, regulere operativ temperatur, hindre blanding og redusere sol som skaper kjølebehov i bygget. Resultatene viser at det vil være nødvendig å implementere solavskjermingssystem i bygget for å forbedre inneklimate og redusere energibehovet.

Den tekniske utformingen på bygget avgjør varmetapet fra bygningskroppen og selv med god isoleringsgrad på bygningen vil det forekomme varmetap til omgivelsene. Det kan konkluderes med at valget av riktig klimafil vil være nødvendig for å kunne få så riktige verdier som mulig når man kjører energi- og inneklimasimuleringer. Energibehovet ble endret når ulike klimafil for omtrent samme plass ble simulert for det samme bygget. På det meste gav det spesifikke energibehovet en forskjell på nesten 10 % ved to ulike klimafil-simuleringer for samme bygg. I tillegg viste det seg at ved endringer i klimafil så er det temperaturparameteren i filen som spiller størst rolle for energibehovet og inneklimate i bygget. En økning på 20 % i temperaturen gav en økning i energibehovet på omtrent 15 % for modellen. Optimalt sett burde det utarbeides ett sett med klimafil for ulike steder i Norge som brukes under slike simuleringer. Feil klimafil kan altså gi feil konklusjon og derfor er det viktig at det opplyses om at ulike klimafil vil gi forskjellige resultat.

12 Videre arbeid

Resultatene i denne oppgaven er basert på å kjøre simuleringer med de kritiske parameterne som ble funnet i litteraturstudien. Simuleringen ble gjort for et kontorbygg i simuleringsprogrammet IDA ICE. En prosess for å finne ut om en simuleringsmodell med dobbelfasade gir et realistisk bilde på hvordan den doble fasaden kan endre energibehov og inneklima, er å sammenligne en simulert modell opp mot reelle målinger fra det virkelig bygget. Dette vil kunne gi svar på om simuleringsprogrammer kan forutse energibehovet til bygningen samt gi svar på om resultatet som et simuleringsprogram gir er realistiske. Siden det er få analyser på bygg med dobbelfasader som er simulert i IDA ICE, vil det derfor anbefales at det gjøres en slik analyse hvor reelle verdier blir sammenlignet med simulerte verdier for å finne ut hvor sikker resultatene for dette programmet er. Dersom det ikke forekommer realistiske verdier for bygget som det skal simuleres med, kan det være nødvendig å bygge modellen i flere ulike energisimuleringsprogram og deretter sammenligne resultatene.

I oppgaven har det vært vanskelig å skjønne hvordan temperaturen endrer seg med høyden i hulrommet, og dermed kan det være nødvendig å utføre en CFD-analyse som vil kunne gi en bedre forståelse for akkurat dette. Et problem med dobbel-fasade konseptet er at det kan oppstå kondens både på utsiden og innsiden av den ytre glassfasaden. Kondens kan oppstå på en flate når denne er kaldere enn lufta omkring og dersom det er tilstrekkelig fuktighet i lufta (Haase and Wigenstad, 2010). Kondensen er forårsaket av underkjøling av den ytre glassfasaden og avhenger av en kombinasjon av en rekke klimaforhold som luftens temperatur, omgivelsenes strålingstemperatur, relativ fuktighet og vindhastighet. Dermed vil det være viktig å se på problemstillinger og kjøre simuleringer som har fokus på dette området. Et annet område som det vil være interessant å se nærmere på er om den doble fasaden vil redusere støy fra omgivelsene. Mange nye kontorbygg vil i dag bygges ved svært trafikkerte veier, som støyskjerm eller buffer mot hovedveier, for å skjerme støymfintlig bebyggelse som boliger, skoler osv. Dette gjør at fasaden i nye kontorbygg vil være svært utsatt for støy, og vil derfor være avhengig av en støydempende fasade.

Det kan være nødvendig å få et enda nærmere innblikk i hvordan luftstrømningen i hulrommet fungerer. Ved bruk av mekanisk ventilasjon kan vifter være med å dra friskluft inn i hulrommet uten at man trenger å være opptatt av uteomgivelsene for oppdriften. Her er det naturlig at noe av varmen fra hulrommet gjenvinnes for å varme opp tilluften til ventilasjonsanlegget til bygget. Det vil være interessant å se om dette vil medføre besparelsen eller kostnader ved bruk av vifter for å trekke luften gjennom den doble fasaden. For nærmere analyse av luftstrømningen med naturlig ventilasjon kan det være nødvendig å se om volumstrømmen i hulrommet kan bedres dersom åpningene øverst og nederst mellom hulrommet og omgivelsene har ulike areal. Ulik åpningsstørrelse vil kunne gi ulike trykkforskjeller i den doble fasaden, slik at man sikrer bedre luftgjennomstrømning for å transportere bort varm luft. Det kan også være nødvendig å gjøre en analyse på ulike farger på solavskjermingsystemet, hvor mørkere farger vil absorbere en større andel av varmen fra solstrålingen og varme opp hulrommet ytterligere. En endring i temperatur vil kunne påvirke luftgjennomstrømningen i hulrommet.

Det vil være nødvendig å utføre en økonomisk analyse for å få bedre oversikt over de virkelige besparelsene ved bruk av doble fasader. En beregning av kostnader på bygningskonstruksjonen med og uten doble fasader vil gi et bedre bilde på om det er mulig å oppnå eventuelle besparelser. Man er klar over at både bygningskonstruksjonen, investeringskostnadene og vedlikeholdskostnadene vil være høye med en dobbelfasade, men det er usikkert om man kan spare noe på redusert energibehov og forbedret inneklima sammenlignet med en enkelfasade.

Referanseliste

- ANDRESEN, I. 2002. Dobbeltfasader. Trondheim: SINTEF.
- ANDRESEN, I. 2008. Planlegging av solvarmeanlegg for lavenergi boliger og passivhus. En introduksjon.
- BALDINELLI, G. 2009. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment*, 44, 1107-1118.
- BHANDARI, M., SHRESTHA, S. & NEW, J. 2012. Evaluation of weather datasets for building energy simulation. *Energy and Buildings*, 49, 109-118.
- BOLIGENØK. *Teknisk informasjon, Passivhus/Lavenergi* [Online]. Available: <http://www.boligenok.no/teknisk-informasjon/passivhus/> [Accessed 10. november 2014].
- BRYN, I. H., BJØRNULF, A., GEDSØ, S. & KARLSEN, L. 2014. Glass i fasader og solavskjerming. In: ERICHSEN & HORGEN A/S (ed.).
- BRYN, I. H., PETERSEN, A. J. & GEDSØ, S. 2011. Varmeløsninger og deres dekningsgrader. Erichsen & Horgen A/S,.
- CRAWLEY, D. B. Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? Proceedings of the 1998 ASHRAE Annual Meeting, 1998 Atlanta, GA, United States. ASHRAE, 498-515.
- CRAWLEY, D. B., HAND, J. W., KUMMERT, M. & GRIFFITH, B. T. 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43, 661-673.
- CRAWLEY, D. B., LAWRIE, L. K., WINKELMANN, F. C., BUHL, W. F., HUANG, Y. J., PEDERSEN, C. O., STRAND, R. K., LIESEN, R. J., FISHER, D. E., WITTE, M. J. & GLAZER, J. 2001. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33, 319-331.
- DE GRACIA, A., CASTELL, A., NAVARRO, L., ORÓ, E. & CABEZA, L. F. 2013. Numerical modelling of ventilated facades: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 539-549.
- DICKSON, A. 2004. *Modelling double-skin façades*. Thesis (M. Sc.). University of Strathclyde: Glasgow, UK.
- DING, W., HASEMI, Y. & YAMADA, T. 2005. Natural ventilation performance of a double-skin façade with a solar chimney. *Energy and Buildings*, 37, 411-418.
- DIREKTORATET FOR BYGGKVALITET. 2011. *Veiledning om tekniske krav til byggverk* [Online]. Available: <http://dibk.no/no/BYGGEREGLER/Gjeldende-byggeregler/Veiledning-om-tekniske-krav-til-byggverk/?dyp=/dyp/content/tekniskekrav/> [Accessed 10. november 2014].
- DOKKA, T. H., SVENSSON, A., WIGENSTAD, T., ANDRESEN, I., SIMONSEN, I. & BERG, T. F. 2011. Energibruk i bygninger, Nasjonal database og sammenligning av beregnet og målt energibruk. SINTEF Byggforsk,.
- EBC. 2013. *EBC Annex 53 Total Energy Use in Buildings: Analysis & Evaluation Methods* [Online]. Available: <http://www.iea-ebc.org/projects/completed-projects/ebc-annex-53/> [Accessed 1. november 2014].
- EDSL. 2012. *Industry-Leading Building Modelling and Simulation* [Online]. Available: <http://www.edsl.net/main/Software.aspx> [Accessed 18. oktober 2014].
- ENERGYPLUS. 2013. *Getting Started with EnergyPlus* [Online]. Available: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/gettingstarted.pdf> [Accessed 14. oktober 2014].
- ENOVA. 2011. *4.3 Energibruk i ulike bygningstyper* [Online]. Available: <http://www.enova.no/innsikt/rapporter/byggstatistikk-2011/4-energibruk-2011/43-energibruk-i-ulike-bygningstyper/490/0/> [Accessed 20. oktober 2014].
- EQUA SIMULATION AB. 2013a. *IDA Indoor Climate and Energy* [Online]. Available: <http://www.equa.se/index.php/en/ida-ice> [Accessed 14. oktober 2014].
- EQUA SIMULATION AB. 2013b. *User Manual IDA Indoor Climate and Energy Version 4.5* [Online]. Available: <http://www.equa.se/deliv/ICE45eng.pdf?lic=ICE40:4812%20> [Accessed 15. oktober 2014].

- ERICHCEN & HORGAN AS 2007. Veileder for utforming av glassfasader.
- ERICHCEN & HORGAN AS 2013. Bruk av BIM i energiberegninger.
- EUROPEAN COMMISSION & J.R.C. 2012. *Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps PVGIS* [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> [Accessed 8. oktober 2014].
- FALLAHI, A., HAGHIGHAT, F. & ELSADI, H. 2010. Energy performance assessment of double-skin façade with thermal mass. *Energy and Buildings*, 42, 1499-1509.
- FORNYBAR. 2007. *Solenergiressursen i Norge, Fornybar* [Online]. Available: <http://www.fornybar.no/solenergi/ressursgrunnlag> [Accessed 2. oktober 2014].
- FORNYBAR. 2013. *Energipolitikk* [Online]. Available: <http://www.fornybar.no/energipolitikk> [Accessed 14. mars 2015].
- GEDSØ, S., BRYN, I. H. & PETERSEN, A. J. 2013. Energioptimalisering favoriserer løsninger som fører til dårlig inneklima, Integret dynamisk simulering av termisk inneklima og energibruk over året. *Passivhus Norden 2013*, 15.
- GOIA, F. 2013. *Dynamic building envelope components and nearly zero energy buildings: theoretical and experimental analysis of concepts, systems and technologies for an adaptive building skin*. 2013:364, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- GRATIA, E. & DE HERDE, A. 2007a. Greenhouse effect in double-skin facade. *Energy and Buildings*, 39, 199-211.
- GRATIA, E. & DE HERDE, A. 2007b. Guidelines for improving natural daytime ventilation in an office building with a double-skin facade. *Solar Energy*, 81, 435-448.
- GRATIA, E. & DE HERDE, A. 2007c. The most efficient position of shading devices in a double-skin facade. *Energy and Buildings*, 39, 364-373.
- HAASE¹, M., WONG, F. & AMATO, A. 2007. Double-Skin Facades for Hong Kong. *ISSN 1816-9554 Surveying and Built Environment* 18, 17.
- HAASE, M. 2011. *Dobbeltfasader i nybygg og ved rehabilitering* [Online]. Available: http://www.bygningsfysikk.no/NorskBygningsfysikkdag2011/02_Haase.pdf [Accessed 8. oktober 2014].
- HAASE, M. & WIGENSTAD, T. 2010. Evaluering av bruk av dobbel fasade som konsept ved oppgradering av eksisterende fasade. *Prosjektrapport 57*. Trondheim: Sintef- NTNU.
- HELLSTRÖM, B., KVIST, H., HÅKANSSON, H. & BÜLOW-HÜBE, H. 2007. Description of ParaSol v3.0 and comparison with measurements. *Energy and Buildings*, 39, 279-283.
- HIEN, W. N., LIPING, W., CHANDRA, A. N., PANDEY, A. R. & XIAOLIN, W. 2005. Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore. *Energy and Buildings*, 37, 563-572.
- HOLLINGSBEE, T., KOOYMANS, J. & MCDONNELL, T. 2009. Designing the Right Double Skin Facade. *Structures Congress 2009*. American Society of Civil Engineers.
- HONG, T., CHANG, W.-K. & LIN, H.-W. 2013. A fresh look at weather impact on peak electricity demand and energy use of buildings using 30-year actual weather data. *Applied Energy*, 111, 333-350.
- HØSEGGEN, R. 2008. *Dynamic use of the building structure: energy performance and thermal environment*, Trondheim, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- HØSEGGEN, R., WACHENFELDT, B. J. & HANSEN, S. O. 2008. Building simulation as an assisting tool in decision making: Case study: With or without a double-skin façade? *Energy and Buildings*, 40, 821-827.
- IYI, D., HASAN, R., PENLINGTON, R. & UNDERWOOD, C. 2014. Double skin façade: Modelling technique and influence of venetian blinds on the airflow and heat transfer. *Applied Thermal Engineering*, 71, 219-229.
- KLEIVEN, T. 2003. *Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities*, Trondheim, NTH.
- KLEIVEN, T. & ASCHEHOUG, Ø. 2005. Double facades at high latitudes: user experiences from Hamar Town Hall. Trondheim: SINTEF Teknologi og samfunn.

- KROG, B.-R., AXELSEN, E. P. & GUNDERSEN, P. 2003. Vannbårne lavtemperatursystemer kombinert med ventilasjon i bygninger. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- KVIST, H. 2006. *ParaSol v3.0 – gratis projekteringshjälpmiddel för solskydd* [Online]. Teknik och forskning. Available: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=699930&fileId=699945> [Accessed 20. oktober 2014].
- LARSEN, O. K., JENSEN, R. L. & HEISELBERG, P. K. 2008. Empirical validation data sets for double skin facade models. The First International Conference on Building Energy and Environment, Aalborg University,.
- LINDBERG, K. B. & MAGNUSSEN, I. H. 2010. Tiltak og virkemidler for redusert utslipp av klimagasser fra norske bygninger. Norges vassdrags- og energidirektorat, NVE.
- LOVDATA. 2005. *Lov om arbeidsmiljø, arbeidstid og stillingsvern mv. (arbeidsmiljøloven)* [Online]. Lovdata. Available: <http://lovdata.no/dokument/NL/lov/2005-06-17-62> [Accessed 1. oktober 2014].
- LOVDATA. 2010. *Forskrift om tekniske krav til byggverk (byggteknisk forskrift)* [Online]. Lovdata. Available: <http://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-03-26-489> [Accessed 28. september 2014].
- LUND, H. 1995. The Design Reference Year, Users Manual. *IEA Solar Heating and Cooling Programme*. Technical University of Denmark.
- LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA. 2014. *ParaSol* [Online]. Energi och Byggnadsdesign. Available: http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Programvaror/Introduktion_till_ParaSol_S-webb.pdf [Accessed 13. oktober 2014].
- MARKVART, T. 2000. *Solar electricity*, Chichester, Wiley.
- MARQUES DA SILVA, F., GOMES, M. G. & RODRIGUES, A. M. 2015. Measuring and estimating airflow in naturally ventilated double skin facades. *Building and Environment*, 87, 292-301.
- MATHISEN, H. M., STANG, J., KLEIVEN, T. & TJELFLAAT, P. O. 2004. Valg mellom naturlig, hybrid og mekanisk ventilasjon. SINTEF Energiforskning AS.
- NILSSON, P.-E. 2003. *Achieving the desired indoor climate: energy efficiency aspects of system design*, Lund, Studentlitteratur.
- NORSK SOLENERGIFORENING. 2014. *Passiv solvarme* [Online]. Available: <http://www.solenergi.no/om-solenergi/teknologi/>.
- NORSK STANDARD 2005. Ergonomi i termisk miljø Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort *ISO 7730:2005*. standard norge.
- NORSK STANDARD 2007a. Inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk. *NS-EN 15251:2007+NA:2014* standard norge.
- NORSK STANDARD 2007b. NS 3031 Beregning av bygningers energiytelse Metode og data. standard norge.
- NORSK STANDARD 2008. Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgang - Beregningsmetode *ISO 6946:2007*. standard norge.
- OESTERLE, E. 2001. *Double-skin facades: integrated planning : building physics, construction, aerophysics, air-conditioning, economic viability*, Munich, Prestel.
- OLJE- OG ENERGIDEPARTEMENTET. 2012. *Regjeringens mål for energieffektivisering i bygg* [Online]. Available: <http://www.regjeringen.no/nb/dokumentarkiv/stoltenberg-ii/oed/Nyheter-og-pressemeldinger/nyheter/2012/regjeringens-mal-for-energieffektiviseri.html?id=708469> [Accessed 5. november 2014].
- PASSIVE HOUSE INSTITUTE. 2012. *About Passive Houses - What is a Passive House?* [Online]. Available: http://passiv.de/en/02_informations/01_whatisapassivehouse/01_whatisapassivehouse.htm [Accessed 3. november 2014].

- PEDERSEN, L. 2007. Use of different methodologies for thermal load and energy estimations in buildings including meteorological and sociological input parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 998-1007.
- PEUHKURI, R., DIRECTOR, M. & TSCHUI, S. C. A. 2011. Principles and specific challenges of very low-energy houses in colder climates and corresponding residential concept houses. *NorthPass* <http://northpass.ivl.se/publicationsfromnorthpass/articles/articles>, 5, c577972135ee95b.
- POIRAZIS, H. 2004. *Double Skin Facades for Office Buildings-Literature Review Report*.
- PROGRAMBYGGERNE. 2013. *SIMIEN* [Online]. Available: <http://www.programbyggerne.no/> [Accessed 30. oktober 2014].
- RAMBØLL 2013. ENERGIREGLER 2015 Forslag til endringer i TEK for nybygg. In: DIREKTORATET FOR BYGGKVALITET (ed.).
- RAMBØLL. 2015. *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)* [Online]. ramboll.no. Available: http://www.ramboll.no/services/bygg_og_design/vvs/cfd [Accessed 30. april 2015].
- SEPPÄNEN, O. 2006. *Indoor environment and productivity in office environment summary of the key contents of REHVA Guidebook no 6* [Online]. Available: [http://www.rehva.eu/fileadmin/Promotional_material/PPTs/Nr 6 Indoor Climate and Productivity in Offices.pdf](http://www.rehva.eu/fileadmin/Promotional_material/PPTs/Nr_6_Indoor_Climate_and_Productivity_in_Offices.pdf) [Accessed 14. november 2014].
- SHAMERI, M. A., ALGHOUL, M. A., ELAYEB, O., ZAIN, M. F. M., ALRUBAIH, M. S., AMIR, H. & SOPIAN, K. 2013. Daylighting characteristics of existing double-skin façade office buildings. *Energy and Buildings*, 59, 279-286.
- SHAMERI, M. A., ALGHOUL, M. A., SOPIAN, K., ZAIN, M. F. M. & ELAYEB, O. 2011. Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1468-1475.
- SINTEF ENERGI Forskning 2007. *ENØK i bygninger: effektiv energibruk*, Oslo, Gyldendal undervisning.
- SKARTEIVT, A., LUND, H. & OLSETH, J. A. 1994. Klima, The Design Reference Year. DNMI, DET NORSKE METEOROLOGISKE INSTITUTT.
- SSB. 2011. *Energibruk, etter bygningstype og byggeår (kWh/m²)* [Online]. Statistisk sentralbyrå. Available: <https://www.ssb.no/statistikkbanken/selectvarval/saveselections.asp> [Accessed 10. mars 2015].
- SSB. 2013. *Energibruk i husholdningene* [Online]. Statistisk sentralbyrå. Available: <https://www.ssb.no/statistikkbanken/selectvarval/saveselections.asp> [Accessed 14. oktober 2014].
- SSB. 2014. *Byggeareal. Bruksareal til annet enn bolig, etter bygningstype (m²) (K)* [Online]. Statistisk sentralbyrå. Available: <https://www.ssb.no/statistikkbanken/SelectVarVal/saveselections.asp> [Accessed 2. februar 2015].
- STAMPE, O. B. 2000. *Varme- og klimateknik: ventilationsteknik*, [Lyngby], Danvak.
- STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUTT. 2006. *Glas i byggeriet, påvirkninger og egenskaper* [Online]. Aalborg universitetet København. Available: <http://www.sbi.dk/byggeteknik/bygningsdele/vinduer-dore-og-glas/anvisning-glas-i-byggeriet/pavirkninger-og-egenskaper> [Accessed 10. oktober 2014].
- STEC, W. J. & PAASSEN, A. H. C. V. 2005. Symbiosis of the double skin façade with the HVAC system. *Energy and Buildings*, 37, 461-469.
- STENE, J. 1997. *Varmepumper: bygningsoppvarming*, Trondheim, SINTEF.
- STENE, J. & SMEDEGÅRD, O. Ø. 2013. Hensiktsmessige varme- og kjøleløsninger i bygninger. COWI. THE ENGINEERING TOOLBOX. *The Engineering ToolBox, Person and Metabolic Heat Gain* [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/metabolic-heat-persons-d_706.html [Accessed 21. oktober 2014].
- THE UNIVERSITY OF WISCONSIN. 2013. *A TRaNsient SYstems Simulation Program* [Online]. Wisconsin University. Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html> [Accessed 14. oktober 2014].
- THEMA CONSULTING GROUP 2013. Energibruk i bygg Trender og drivere. In: NVE (ed.).

- THUE, J. V. 2012. *Husbyggingsteknikk: bygningsfysisk grunnlag, kapittel 4-8 : kompendium emne TBA4160 Bygningsfysikk, grunnkurs : rev. høsten 2012*, [Trondheim], Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- THYHOLT, M., LIEN, A. G. & DOKKA, T. H. 2001. Kartlegging av mekanisk kjøling i nye kontor- og forretningsbygg. In: SINTEF BYGG OG MILJØ (ed.). *Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) ENOVA*.
- TRNSYS. 2014. *What is TRNSYS?* [Online]. Available: <http://www.trnsys.com/> [Accessed 15. oktober 2014].
- U.S DEPARTMENT OF ENERGY. 2011a. *Building Energy Software Tools Directory, TAS* [Online]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=210/pagename=alpha_list [Accessed 19. oktober 2014].
- U.S DEPARTMENT OF ENERGY. 2011b. *Weather Data Sources* [Online]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=369/pagename=alpha_list [Accessed 22. oktober 2014].
- VERSTEEG, H. K. & MALALASEKERA, W. 2007. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, Harlow, Pearson Prentice Hall.
- VON GRABE, J. 2002. A prediction tool for the temperature field of double facades. *Energy and Buildings*, 34, 891-899.
- WALL, M. & BÜLOW-HÜBE, H. 2003. Solar Protection in buildings. *Division of Energy and Building Design*. Lund Institute of Technology.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. 1948. *Health* [Online]. Available: http://www.who.int/topics/mental_health/en/ [Accessed 10. september 2014].
- ZHOU, J. & CHEN, Y. 2010. A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1321-1328.

Vedlegg

A. Klimadata

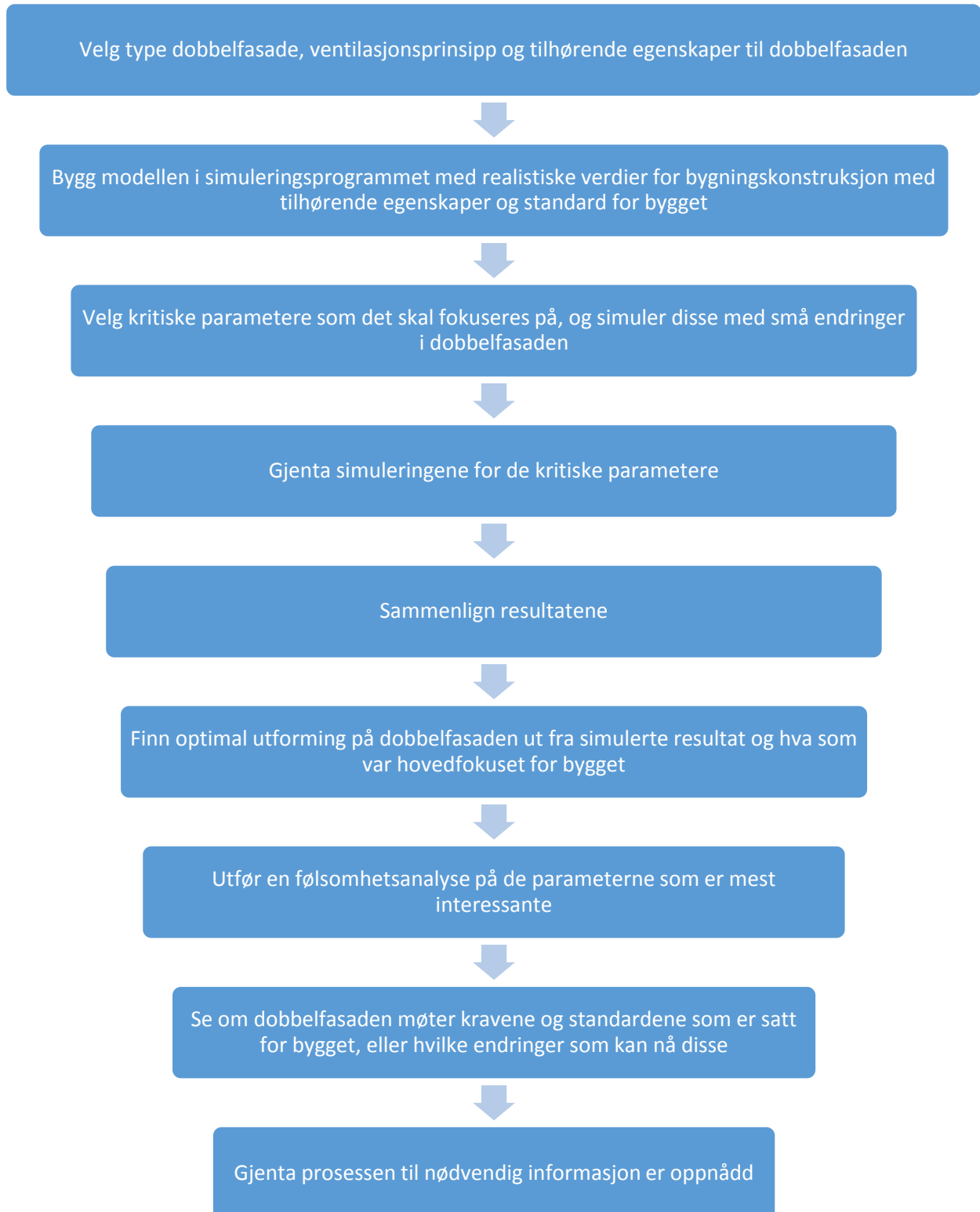
A.1 DRY- klimadata maksimum, minimum og gjennomsnittlig temperatur

A. 1 Tabell: DRY-klimadata

		Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des	Årlig
Oslo	Min	-22,0	-24,7	-17,7	-7,6	-1,0	3,5	8,0	5,2	-1,2	-6,8	-14,7	-20,9	-24,7
	Maks	10,7	10,2	14,1	19,0	26,4	30,8	29,8	32,6	24,2	19,6	12,9	11,2	32,6
	Gj.sn	-3,7	-4,8	-0,5	4,8	11,7	16,5	17,5	16,9	11,5	6,4	0,5	-2,5	6,3
Bergen	Min	-14,7	-12	-8,6	-4,3	-1,7	3,8	5,5	4,0	1,3	-4,3	-9,6	-13,2	-14,7
	Maks	10,1	10,1	13,8	16,7	23,3	26,6	27,1	27,3	23,4	18,3	12,1	9,7	27,3
	Gj.sn	1,0	0,5	2,6	4,7	9,4	12,1	13,6	13,2	10,5	7,3	3,9	1,1	6,7
Andøya	Min	-18,8	-16,7	-18,5	-12,7	-8,5	0,4	2,7	0,8	-2,4	-5,8	-11,5	-14,5	-18,8
	Maks	7,2	7,0	6,9	11,7	19,6	22,7	22,1	22,6	18,1	13,7	8,9	8,1	22,7
	Gj.sn	-2,0	-1,6	-1,2	1,2	5,1	8,1	10,7	10,7	7,6	4,6	0,8	-1,3	3,6

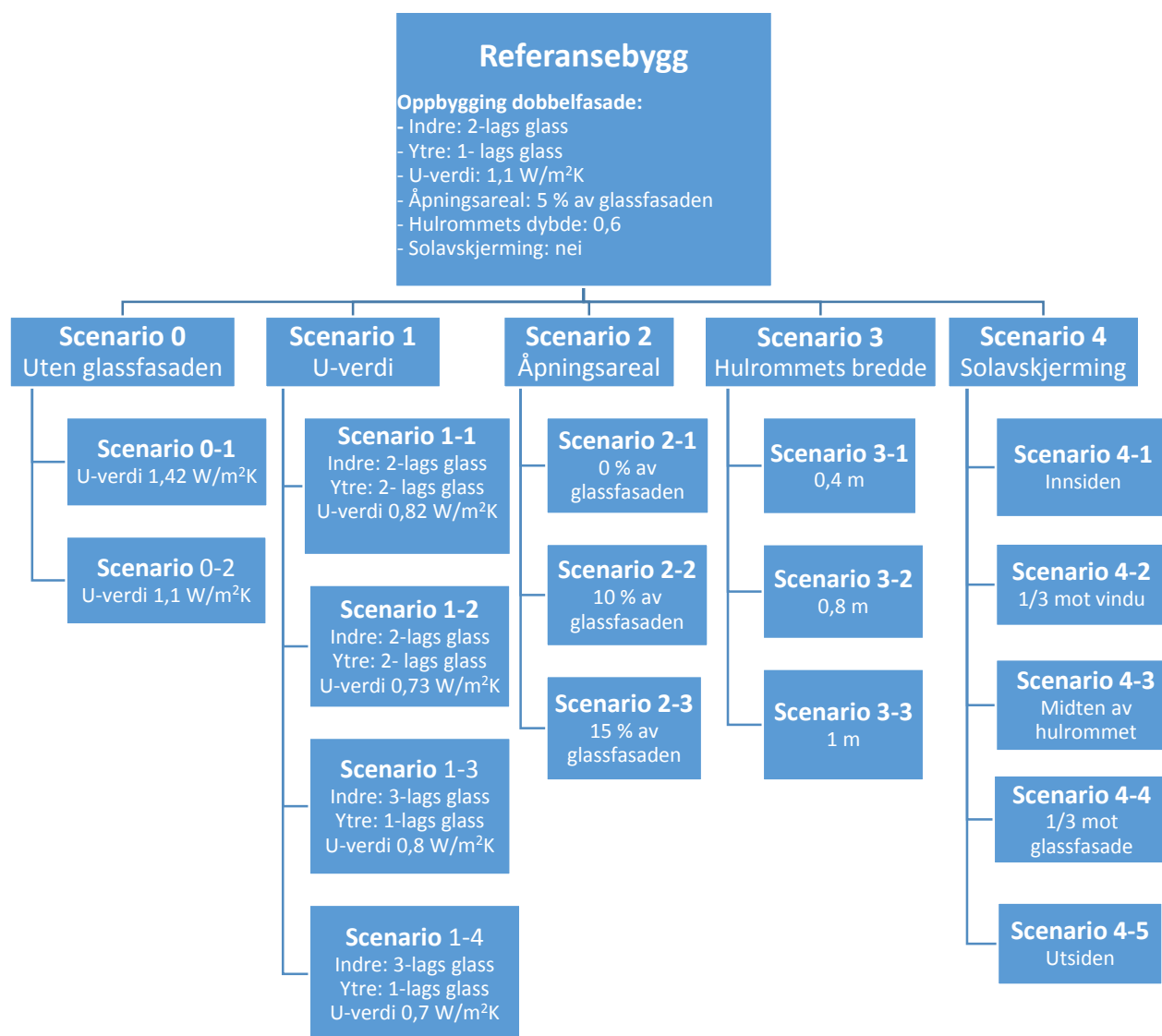
B. Foreslått simuleringsmetodikk og Scenarioene

B.1 Foreslått simuleringsmetodikk



B. 1 Figur: Foreslått simuleringsmetodikk

B.2 Oppsummering av Scenarioene



B. 2 Figur: Scenarioene for referansebygget

B.3 Scenario 0: ParaSol og IDA ICE - Oppbygging av doble fasader

Referansebygget

Existing window types

- 21| SKN154
- 22| Electrochromatic
- 23| EN14501-A
- 24| EN14501-B
- 25| EN14501-C
- 26| EN14501-D
- 27| SingleClear6mm
- 28| Clear2Air6mm
- 29| Referanse_Vindu
- 30| Scenario_1_-_dobbel_dobbel
- 32| Scenario_2_-_trippel_singel

Description of window package

Nr	Glass type	Gas	Gap	Reverse
1	clear_6	Air	600	No
2	clear_6	Argon	10	No
3	low_e_4%			No

Window properties

U-value	g-value	Tsol
1.10	0.506	0.376

Ventilated window / double facade

B. 3 Figur: Oppbygging av doble fasader, referansebygget

Scenario 0-1

Name: Clear_6 + Low_e_4% - U- 1,426

Layers

- Pane: clear_6
- Gap: 10.0 mm Argon - EN673 (WIN7)
- Pane: Low_e_4%

Data for selected layer

Pane: clear_6

Flipped:

Glazing properties at reference conditions

Solar heat gain coefficient	0.613	-
Solar transmittance	0.465	-
Visible transmittance	0.465	-
Glazing U-value	1.426	W/(m2.K)

Calculate

B. 4 Figur: Oppbygging av fasaden, Scenario 0-1

Scenario 0-2

Name: © Triple with suspended low-e film (argon) (WIN7)

Layers

– Outside (ambient or adjacent zone) –

- Pane: CLEAR_6.DAT (WIN7)
- Gap: 12.7 mm Air (10%) / Argon (90%) Mix (WIN7)
- Pane: HM88.SWT (WIN7)
- Gap: 12.7 mm Air (10%) / Argon (90%) Mix (WIN7)
- Pane: CLEAR_6.DAT (WIN7)

– Inside (this zone) –

Data for selected layer

Pane: © CLEAR_6.DAT (WIN7)

Flipped:

Glazing properties at reference conditions

Solar heat gain coefficient	<input type="text" value="0.529"/>	-
Solar transmittance	<input type="text" value="0.386"/>	-
Visible transmittance	<input type="text" value="0.694"/>	-
Glazing U-value	<input type="text" value="1.129"/>	W/(m2.K)

Calculate

B. 5 Figur: Oppbygging av fasaden, Scenario 0-2

B.4 Scenario 1: ParaSol - Oppbygging av doble fasader

B. 6 Tabell: Oversikt over oppbyggingen til Scenario 1

	U-verdi [W/m ² K]	g-verdi [-]	Transmittans - sol [-]
Referansebygg	1,1	0,506	0,376
Scenario 1-1	0,82	0,448	0,306
Scenario 1-2	0,73	0,375	0,233
Scenario 1-3	0,80	0,339	0,233
Scenario 1-4	0,70	0,437	0,284

Scenario 1-1

The screenshot shows the 'Description of window package' window for Scenario 1-1. On the left, a list of 'Existing window types' includes '30| Scenario 1 - dobbel dobbel'. The main table lists four layers:

Nr	Glass type	Gas	Gap	Reverse
1*	PN-OPTIFLOAT_6	Argon	12	No
2*	PN-OPTIFLOAT_6	Air	600	No
3	clear_6	Argon	12	No
4	low_e_4%			No

Below the table, 'Window properties' are shown: U-value: 0,82, g-value: 0,448, Tsol: 0,306. The 'Spectral calculation' section has 'Use spectral data' selected. A checkbox for 'Ventilated window / double facade' is checked.

B. 7 Figur: Oppbygging av doble fasader, Scenario 1-1

Scenario 1-2

The screenshot shows the 'Description of window package' window for Scenario 1-2. On the left, a list of 'Existing window types' includes '31| Dobbelt med clear og low e'. The main table lists four layers:

Nr	Glass type	Gas	Gap	Reverse
1	clear_6	Argon	10	No
2	low_e_4%	Air	600	No
3	clear_6	Argon	10	No
4	low_e_4%			No

Below the table, 'Window properties' are shown: U-value: 0,73, g-value: 0,375, Tsol: 0,233. The 'Spectral calculation' section has 'Use integrated data' selected. A checkbox for 'Ventilated window / double facade' is checked.

B. 8 Figur: Oppbygging av doble fasader, Scenario 1-2

Scenario 1-3

Existing window types

- 21| SKN154
- 22| Electrochromatic
- 23| EN14501-A
- 24| EN14501-B
- 25| EN14501-C
- 26| EN14501-D
- 27| SingleClear6mm
- 28| Clear2Air6mm
- 29| Referanse_Vindu
- 30| Scenario 1 - dobbel dobbel
- 31| Dobbelt med clear og low e

Window properties

U-value g-value T_{sol}
W/m²K - -

0,80 0,339 0,233

Ventilated window / double facade

Description of window package

Nr	Glass type	Gas	Gap	Reverse
1	clear_6			No
		Air	600	
2	low_e_4%			No
		Argon	12	
3	clear_6			No
		Argon	12	
4	low_e_4%			No

Library

Glass
Gas

B. 9 Figur: Oppbygging av doble fasader, Scenario 1-3

Scenario 1-4

Existing window types

- 21| SKN154
- 22| Electrochromatic
- 23| EN14501-A
- 24| EN14501-B
- 25| EN14501-C
- 26| EN14501-D
- 27| SingleClear6mm
- 28| Clear2Air6mm
- 29| Referanse_Vindu
- 30| Scenario 1 - dobbel dobbel
- 32| Scenario 2 - trippel singel

Window properties

U-value g-value T_{sol}
W/m²K - -

0,70 0,437 0,284

Ventilated window / double facade

Description of window package

Nr	Glass type	Gas	Gap	Reverse
1	clear_6			No
		Air	600	
2*	PN-OPTIFLOAT_6			No
		Argon	10	
3*	PN-OPTITHERM_SN_6			No
		Argon	10	
4*	PN-OPTITHERM_SN_6			No

Library

Glass
Gas

Spectral calculation

Use spectral data
 Use integrated data

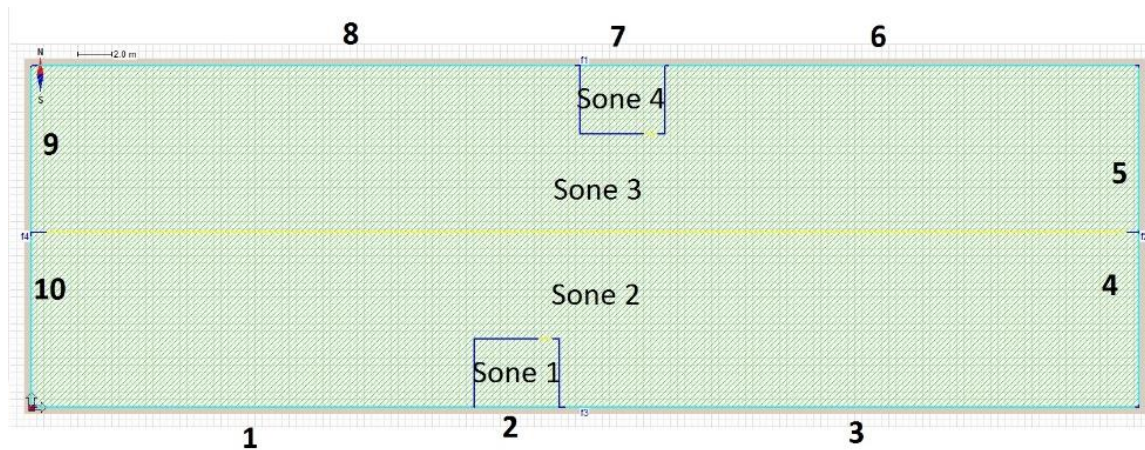
* Spectral data

B. 10 Figur: Oppbygging av doble fasader, Scenario 1-4

B.5 Scenario 2 og 3: Størrelsen på åpningene og dybden på hulrommet

B. 11 Tabell: Beregning av åpningsareal

Glassfasade	Størrelse på åpningene		Prosent av glassarealet		
	Ytre glassareal [m ²]	Referansebygg 5% [m ²]	Scenario 2-1 0% [m ²]	Scenario 2-2 10% [m ²]	Scenario 2-3 15% [m ²]
1	78	3.9	0.00	7.8	11.7
2	15	0.75	0.00	1.5	2.25
3	102	5.1	0.00	10.2	15.3
4	30	1.5	0.00	3	4.5
5	30	1.5	0.00	3	4.5
6	83.4	4.17	0.00	8.34	12.51
7	15	0.75	0.00	1.5	2.25
8	96.6	4.83	0.00	9.66	14.49
9	30	1.5	0.00	3	4.5
10	30	1.5	0.00	3	4.5



B. 12 Figur: Nummer på glassfasadene

B. 13 Tabell: Scenario 3, dybde på hulrommet

Referansebygg	0,6 m
Scenario 3-1	0,4 m
Scenario 3-2	0,8 m
Scenario 3-3	1 m

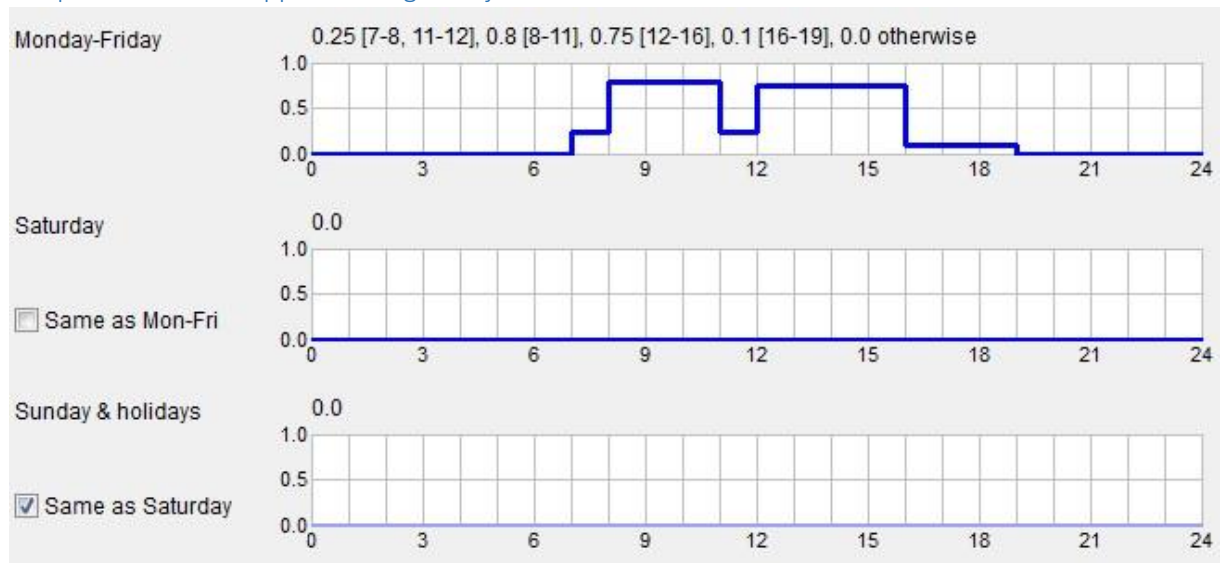
B.6 Scenario 4: Solavskjerming

B. 14 Tabell: Scenario 4, plassering av solavskjermingssystemet

Referansebygg	Ingen
Scenario 4-1	Innsiden
Scenario 4-2	1/3 av hulrommet mot vinduet; 0,2 m fra vinduet
Scenario 4-3	Midten av hulrommet; 0,3 m fra vinduet
Scenario 4-4	1/3 av hulrommet mot glassfasaden; 0,2 m fra glassfasaden
Scenario 4-5	Utsiden

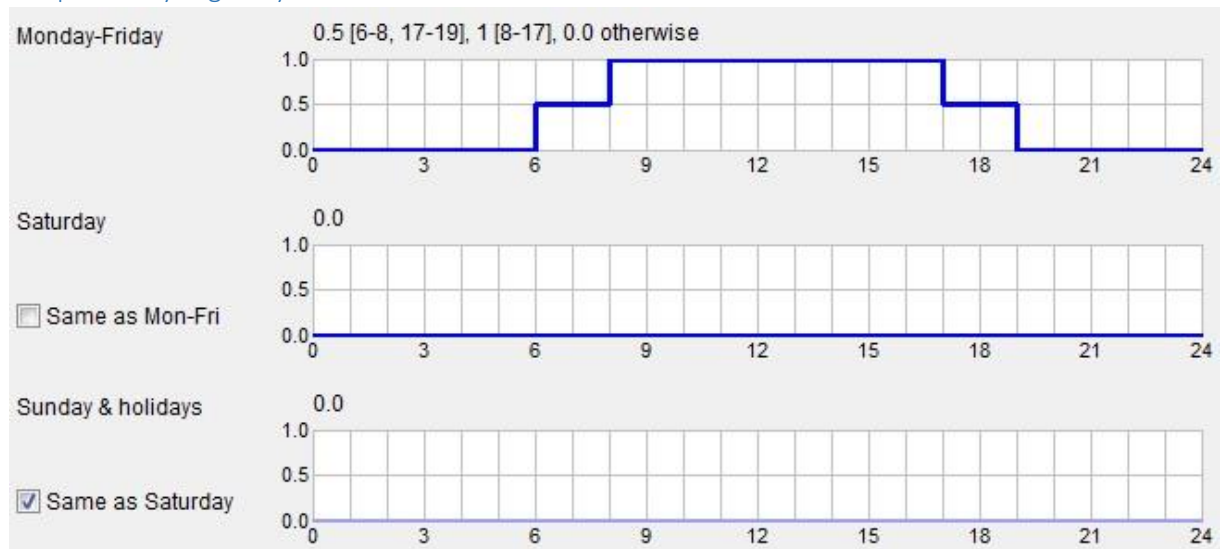
C. Tidsplaner

Tidsplan for de som oppholder seg i etasjen



C 1 Figur: Tidsplan for de som oppholder seg i etasjen

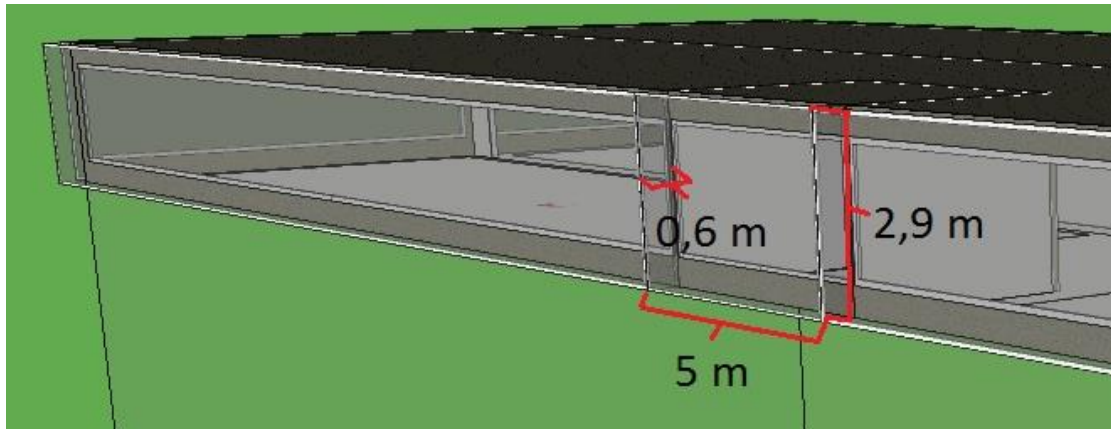
Tidsplan for lys og utstyr



C 2 Figur: Tidsplan for lys og utstyr

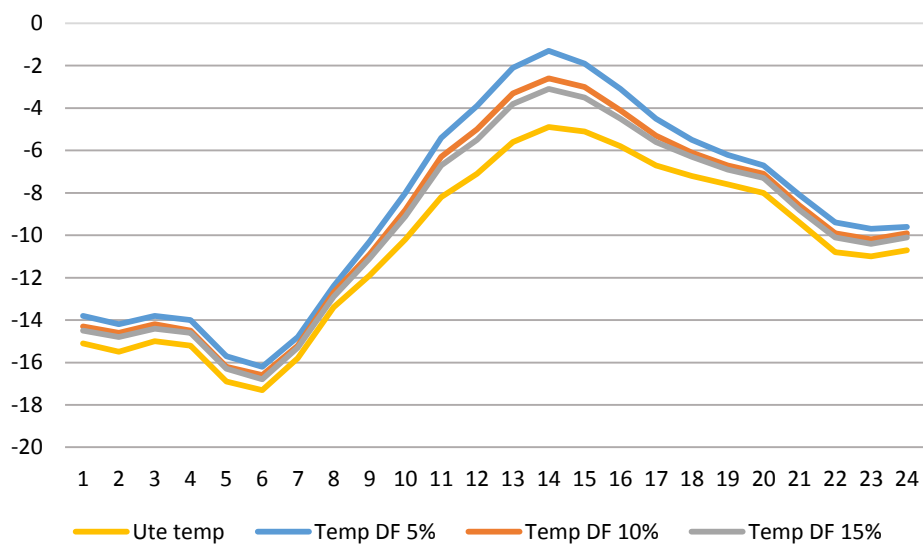
E. Beregnet volumstrøm i hulrommet

Det er valgt å se på en spesifikk dag i simuleringen, 11/3, for å kontroll beregne volumstrømmen i hulrommet. Årsaken til valget av denne dagen er at det ifølge IDA ICE vil være den dagen hvor volumstrømmen er høyest. Det er derfor muligheter for at det kan oppstå høye hastigheter i åpningene denne dagen og dette kan forårsake støy. Det er valg å se på referansebygget som har en dybde på 0,6 m, og volumstrømmen som går igjennom den doble fasaden for Sone 1.



E 1 Figur: Brekke, høyde og dybde på den doble fasaden i Sone 1

Temperaturene i den doble fasaden med forskjellig åpningsareal mellom hulrommet og omgivelsene er tatt fra resultatene i IDA ICE og vises i figuren under. Det er disse temperaturene den beregnede volumstrømmen har tatt utgangspunkt i.



E 2 Figur: Temperatur i hulrommet ved ulike åpningsareal i IDA ICE

E 3 Tabell: Verdier som skal brukes i beregningen av volumstrømmen i hulrommet i Sone 1

	$A_i = A_e$ [m ²]	H_1 [m]	T_i [K]	T_u [K]	Δt [K]
5 %	0,75	1,45	271,7	268,1	3,6
10 %	1,5	1,45	270,4	268,1	2,3
15 %	2,25	1,45	269,9	268,1	1,8

Nøytralsonen i hulrommet kan finnes ved ligning 6, hvor h [m] er høyden mellom åpningene, A_i [m²] er innløpsåpningen og A_e [m²] er utløpsåpningen.

$$H_1 = \frac{h}{1+m} \quad (6)$$

$$m = \left(\frac{A_i}{A_e}\right)^2 \quad (7)$$

Volumstrømmen, q_v [m³/s], gjennom hulrommet kan forenklet bestemmes av ligning 9, hvor C_{ai} er åpningsfaktor bestemt av åpningens form. For en skarpkantet åpning er $C_{ai} = 0,6$, men IDA ICE opererer med en $C_d=1$, derfor vil det også bli benyttet her (EQUA Simulation AB, 2013b).

$$q_V = q_{Vi} = C_{ai} \cdot A_i \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta t \cdot H_1}{T_i}} \quad (8)$$

E 4 Tabell: Beregnet mot simulert volumstrøm

Åpningsstørrelse	Beregnet volumstrøm [l/s]	Volumstrøm i IDA ICE [l/s]
5 %	460	476
10 %	738	765
15%	980	1008

F. Solavskjerming i modellen med beste løsning på den doble fasaden

Beste løsning på den doble fasaden med solavskjerming i hulrommet

Active system - properties

U-value: 0,64 W/m2.K
g-value: 0,248
Tsol: 0,136

Product information: Gap number: 1

Supplier: 02|AB_LUDVIG_SVENSSON
Product: 2015| Focus 6710 Off-white

Short wave radiation

Front side	Dir. transmittance: 19%	Dif. transmittance: 30%	Spec. reflectance: 0%	Dif. reflectance: 46%	Absorptance: 5%
Back side	Dir. transmittance: 19%	Dif. transmittance: 30%	Spec. reflectance: 0%	Dif. reflectance: 46%	Absorptance: 5%

Long wave radiation

Front side	Transmittance: 22%	Reflectance: 10%	Emittance: 68%
Back side	Transmittance: 22%	Reflectance: 10%	Emittance: 68%

Active system - window, sunshade

Window Name: Trippel+_singel_m_solav.
ID: 34 Number of panes: 4

External sunshade: Name: ID: Function:

Interpane sunshade: Name: Focus 6710 Off-white
ID: 2015 Function: Screen/Roller-blind

Internal sunshade: Name: ID: Function:

F 1 Figur: Beste løsning på den doble fasaden med solavskjerming i hulrommet

Beste løsning på den doble fasaden med innvendig solavskjerming

Active system - properties

U-value: 0,68 W/m2.K
g-value: 0,371
Tsol: 0,160

Product information: Closed air gap

Supplier: 02|AB_LUDVIG_SVENSSON
Product: 2141| Cinq 6710 Off-White

Short wave radiation

Front side	Dir. transmittance: 19%	Dif. transmittance: 29%	Spec. reflectance: 0%	Dif. reflectance: 45%	Absorptance: 7%
Back side	Dir. transmittance: 19%	Dif. transmittance: 29%	Spec. reflectance: 0%	Dif. reflectance: 45%	Absorptance: 7%

Long wave radiation

Front side	Transmittance: 48%	Reflectance: 5%	Emittance: 47%
Back side	Transmittance: 48%	Reflectance: 5%	Emittance: 47%

Active system - window, sunshade

Window Name: Trippel+_singel_m_solav.
ID: 34 Number of panes: 4


External sunshade: Name: ID: Function:

Interpane sunshade: Name: ID: Function:

Internal sunshade: Name: Cinq 6710 Off-White
ID: 2141 Function: Screen/Roller-blind

F 2 Figur: Beste løsning på den doble fasaden med innvendig solavskjerming

Beste løsning på den doble fasaden med utvendig solavskjerming



Product information

Supplier: 05| Copaco_Screenweavers

Product: 5001| Serge 600 - S600/0202 - white/white

Emittance: 90%

Reflectance: 66%

Dif. transmittance: 17%

Dir. transmittance: 4%

Active system - window, sunshade

Window

Name: Trippel+_singel_m_solav.

ID: 34 Number of panes: 4

External sunshade

Name: Serge 600 - S600/0202 - white/white - frontside

ID: 5001 Function: Screen

Interpane sunshade

Name:

ID: Function:

Internal sunshade

Name:

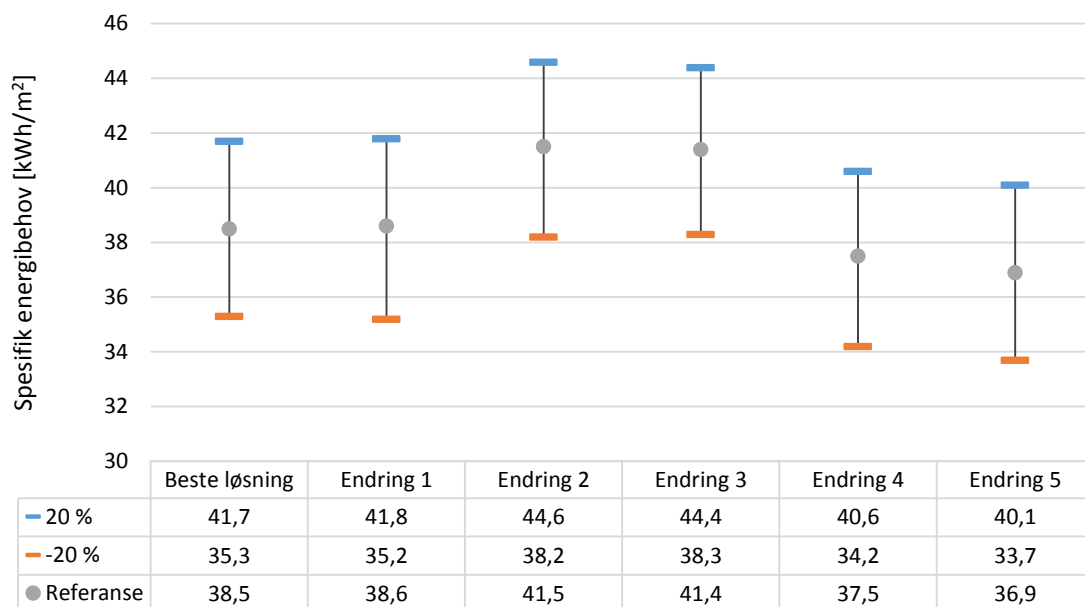
ID: Function:

F 3 Figur: Beste løsning på den doble fasaden med utvendig solavskjerming

G. Følsomhets- og klimadataanalyse

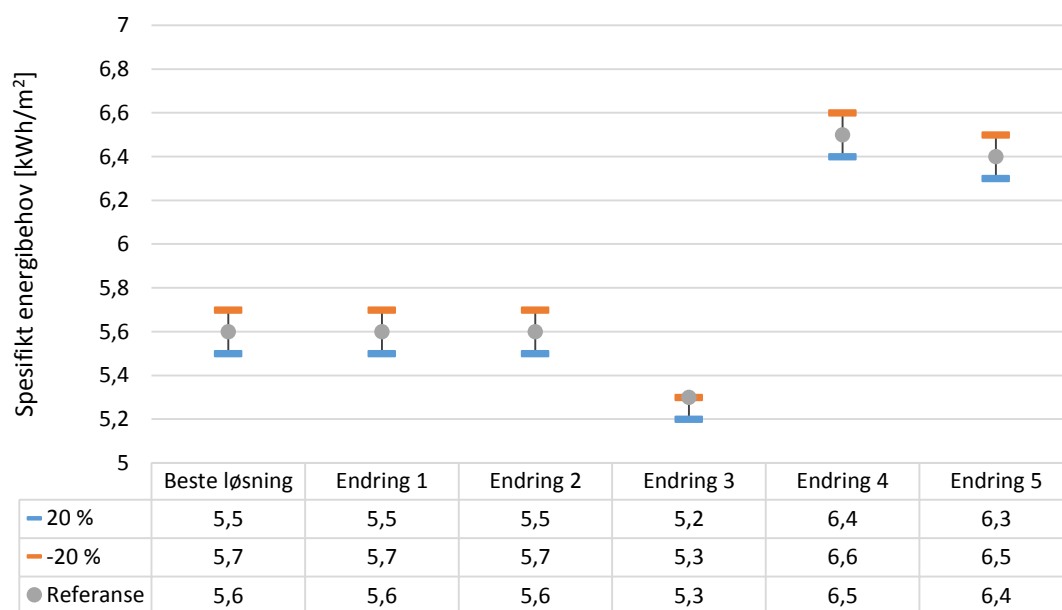
G.1 Følsomhetsanalyse

Varmebehov ved ulike endringer i følsomhetsanalysen for modellen med beste løsning på dobbelfasaden



G 1 Figur: Varmebehov ved ulike endringer i følsomhetsanalysen for modellen med beste løsning på dobbelfasaden

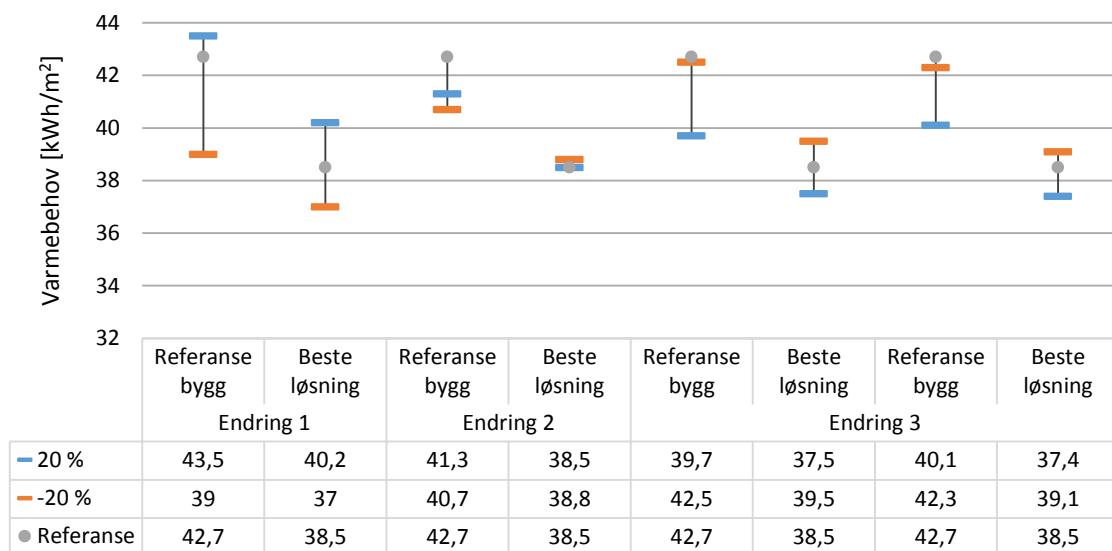
Kjølebehov ved ulike endringer i følsomhetsanalysen for modellen med beste løsning på dobbelfasaden



G 2 Figur: Kjølebehov ved ulike endringer i følsomhetsanalysen for modellen med beste løsning på dobbelfasaden

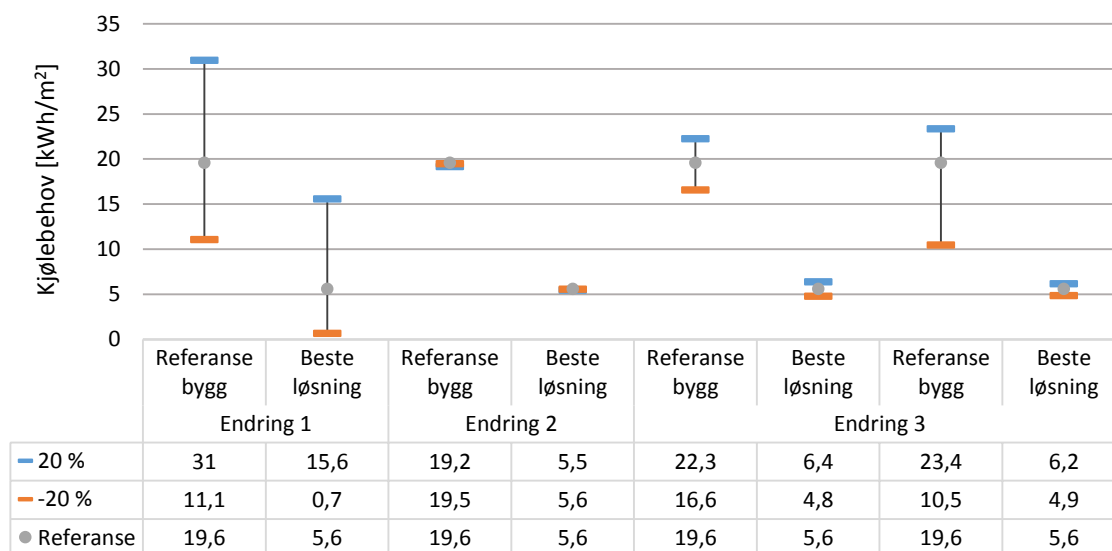
G.2 Klimadataanalyse

Varmebehov ved ulike endringer i klimafilen for referansebygget og modellen med beste løsning på dobbelfasaden



G 3 Figur: Varmebehov ved ulike endringer i klimafilen for referansebygget og modellen med beste løsning på dobbelfasaden

Kjølebehov ved ulike endringer i klimafilen for referansebygget og modellen med beste løsning på dobbelfasaden



G 4 Figur: Kjølebehov ved ulike endringer i klimafilen for referansebygget og modellen med beste løsning på dobbelfasaden