

Analyse av energibruk og termisk inneklima i yrkesbygg med passivhusstandard

Kjetil Torset Voldhaug

Master i energi og miljø

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Rasmus Z Høseggen, EPT

Medveileder: Ida H. Bryn, Erichsen & Horgen AS
Ivar R. Ørnes, Erichsen & Horgen AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosesseteknikk

Masteroppgave

for

Stud.techn Kjetil Torset Voldhaug

Våren 2012

Analyse av energibruk og termisk inneklima i yrkesbygg med passivhusstandard

Analysis of energy consumption and indoor climate in office buildings with passive house standard

Bakgrunn

I dag utgjør energi i bygninger omtrent 40 % av samlet landbasert energibruk, og det er derfor et betydelig reduksjonspotensiale ved mer energieffektive bygg.

Det som er kommet på banen i Norge de siste årene er passiv- og lavenergihus. Dette er spesielt tette og godt isolerte bygg med svært lavt varmetap. En rekke byggeprosjekt med lavenergi- og passivhusstandard blir i dag realisert i Norge. Selv om denne byggestandarden er på full fart inn i byggebransjen, er det gjennomført svært få studier av inneklimaet i denne type bygg sammenlignet med studier på energibruk. Noen av de få studier som er gjennomført indikerer at denne byggestandarden kan medføre en rekke uheldige forhold i henseende til termisk inneklima.

Dagens forslag til passivhusstandard stiller strenge krav til oppvarming og ventilasjon samt gir anbefalinger til termisk komfort. Standarden angir imidlertid ikke krav til dokumentasjon av inneklima og termisk komfort sammen med energiberegningen.

Rapporten "Energibruk i lavenergi- og passivbygg. En sammenligning av forventet og målt energibruk" utarbeidet av Xergia AS for Energi Norge (31.01.2011) poengterer at databeregninger og reelle målinger av energibruk (primært til oppvarming) for lavenergi- og passivbygg ofte viser stor spredning i sammenhengen mellom forventet og målt energibruk. En av årsakene til avvik mellom teoretisk beregnet og målt energi kan være at systemløsningene ikke gir et tilfredsstillende termisk inneklima. En konsekvens av dette er at de tekniske anlegg ofte må driftes annerledes enn opprinnelig tenkt, noe som kan resultere i endret energibruk.

Mål

Gjennom denne oppgaven skal det gjøres en analyse av energibruk og termisk inneklima i yrkesbygg med passivhusstandard ved hjelp av simuleringverktøyet IDA ICE 4.0. Ulike passive og aktive systemløsninger, både av bygningsmessige og teknisk art, skal vurderes opp mot hverandre. Målet er å komme frem til forslag til løsninger som gir et lavt energibehov under forutsetning at et godt termisk inneklima ivaretas.

Oppgaven er en videreføring av kandidatens prosjektoppgave. Endelig innhold og vinkling på oppgaven skal innledningsvis avklares med faglig ansvarlig og veiledere samt også detaljutføres i samarbeid med firma Erichsen & Horgen AS, Oslo.

Erichsen & Horgen AS vil besørge nødvendig programlisens, relevante passivhusprosjekter og veiledning i bruk av simuleringverktøyet.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Aktuelle systemløsninger og signifikante parametere med betydning for energibruk og termisk innklima i yrkesbygg med passivhusstandard skal analyseres. Det er ønskelig at både bygningsmessige og tekniske løsninger medtas, både av passiv og aktiv art.
2. Etabler simuleringsmodeller for to passivhus av ulik utforming og beliggenhet i IDA ICE 4.0. Dette bør fortrinnsvis være kontorbygg, men undervisningsbygg kan også være aktuelt. Det er ønskelig at det tas utgangspunkt i reelle passivhusprosjekter. En representativ del av byggene studeres.
3. Ved hjelp av simuleringer, foreta en detaljstudie av hvordan aktuelle systemløsninger og signifikante parametere påvirker termisk komfort og energibruk i de to byggene. Følsomheten i simuleringresultatene skal også vurderes med hensyn på parametere som påvirker reell energibruk, med spesiell vekt på "feil"/annen bruk av bygget enn forutsatt, slik det refereres til i prosjektrapporten. I analysen skal det være fokus på at det er konsistens mellom de valgte tekniske løsninger, termisk komfort og energi. Termisk komfort skal vurderes i hele sonen/lokalet som studeres, eksempelvis både i kjernen av bygget og ute ved fasaden.
4. Foreslå systemløsninger og anleggsparametere som er egnet i forhold til å oppnå et lavt energibehov samtidig som et godt termisk inneklima ivaretas.

” - ”

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende 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.

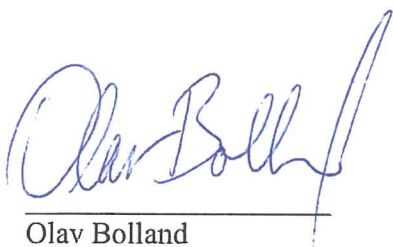
Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg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

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.

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, institutt navn, 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.

NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 16. januar 2012



Olav Bolland
Instituttleder



Rasmus Z. Høseggen
Faglærer/veileder

Medveileder:

Sivilingeniør Ivar Rognhaug Ørnes, Erichsen & Horgen A/S, Oslo. Tlf: 220 26 310

e-mail: iro@erichsen-horgen.no/Professor II, PhD Ida M. Bryn, Erichsen & Horgen A/S

Stud.techn Kjetil Torset Voldhaug
Masteroppgave, NTNU, våren 2012

Veileder, NTNU:
Dr.ing. Rasmus Z. Høseggen

Veiledere, Erichsen & Horgen AS:
Dr.ing. Ida H. Bryn, siv.ing. Ivar R. Ørnes

Sammendrag

Kravene til å redusere energiforbruk i eksisterende og ny bygningsmasse øker stadig. Det er derfor viktig å se på hvordan disse kravene kan oppnås uten at det går på bekostning av inneklimaet. Denne rapporten undersøker hvordan ulike parametere og systemløsninger påvirker et byggs energiytelse og inneklima.

Det benyttes i dag en rekke standarder som setter kriterier for prosjektering og energiberegning av bygg. Kriteriene omhandler blant annet bygningsfysikk, installasjoner og energibehov. For passivhus er det allerede utarbeidet en standard for bolighus, mens en standard for yrkesbygg er på god vei. Fra 2015 skal det i Norge innføres passivhusnivå i byggforskriftene. Det er nødvendig for en hver bruker av disse å være kritisk til hvordan man benytter seg av disse kriteriene i simuleringer og byggprosjektering generelt.

Rapporten beskriver innledningsvis momenter rundt vurdering av energiytelse og termisk komfort, og enkelte problemstillinger orientert rundt norske standarder og forskrifter. Deretter velges en rekke systemløsninger og parametere som er aktuelle å analysere. Disse er av både passiv og aktiv art. Av passiv art vurderes to ulike fasadeutførelser. Av aktiv art er det hovedfokus på sammenlikning av romkjøling og ventilasjonskjøling, med eller uten nattventilasjon og ved ulike settpunkter for kjøling.

Bygget som simuleres er et kontorbygg i Oslo som skal stå ferdig rundt årsskiftet 2012/2013. Det opprettes så simuleringsmodeller for dette bygget i simuleringsverktøyet IDA ICE 4.2. Modellene som er utarbeidet varierer mellom utsnitt av ytre og indre soner av bygget, med den hensikt å studere termiske forhold innad i bygget. Det er også gjennomført årssimuleringer av en representativ etasje for bygget for å analysere byggets energiytelse. Her er det brukt ulike inndata fra forskjellige standarder.

Rapporten anbefaler ventilasjonskjøling og nattkjøling som en systemløsning som gir tilfredsstillende termisk komfort samtidig som det gir bygget god energiytelse. Resultatene som har blitt utarbeidet viser også hvordan ulike fasadeutførelser med ulik glassandel påvirker byggets termiske inneklima og energiytelse. Et rom i kjernen av bygget har også blitt studert med tanke på tilførsel av luftmengder til rom som står tomme i lengre tid.

Årssimuleringene viser at byggets energiytelse påvirkes av minimumsluftmengdene som er satt for ventilasjonskjøling. Dersom disse er for høye om vinteren vil det kjøle ned bygget unødvendig, og kompensasjon må til med oppvarming. Riktig valg av minimumsmengder gjør ventilasjonskjøling til det beste valget energimesig. Dette avhenger selvsagt også av riktig tilluftstemperatur og reelle komponenter som tilrettelegger stor variasjon i luftmengder og lave tilluftstemperaturer.

Ved bruk av effektiv solavskjerming som aktiveres ved 50 W/m^2 er det funnet at ulike soneinndelinger av bygget har mindre å si for resultatet av en energiberegning.

Summary

The demands to reduce energy consumption in existing and new buildings are increasing. It is therefore important to look at how these requirements can be achieved without compromising the indoor environment. Building engineering simulation software is used increasingly to calculate the building's energy performance and to evaluate indoor air quality and thermal comfort. Therefore it is important to have good competence when using such simulation programs.

In Norway there is today a number of standards that set criteria for the design of buildings. For passive houses a standard has been developed for residential buildings, while a standard for non-residential buildings is well on its way and is expected to be introduced from the autumn 2012. From 2015, Norway will introduce passive house level to the national mandatory building regulations. It is necessary for every user of these to be critical to how to make use of these simulations and building design in general.

The report describes surrounding the assessment of energy performance and thermal comfort. Then a variety of system solutions and parameters that are relevant to analyze are chosen. These are both passive and active types. Passive types considered two different exterior designs. Of active types the main focus lies on the comparison of local cooling and ventilation cooling, with or without night ventilation and at different setpoints for cooling.

The building which is simulated is an office building in Oslo, which will be completed around the end of 2012/2013. It is created simulation models for this building in the simulation tool IDA ICE 4.2. The models developed varies between sections of the outer and inner zones of the building, in order to study the thermal conditions within the building. There have also been done energysimulations over the course of a year of a representative floor to assess the building's energy performance. For this model there has been used several different input sets from different norwegian standards and regulation.

The report recommends ventilation cooling and night cooling as a system solution that provides adequate thermal comfort while providing good energy performance. The results also shows how different facade designs with different glass portions influence the building's thermal indoor climate and energy performance. A room in the core of the building has also been studied with regard to the supply of air flow to rooms that are empty for a long time.

The energy simulations show that the building's energy performance is influenced by the minimum airflows set for ventilation cooling. If these are too high in the winter, it will cool the building unnecessary, and compensation must be done with heating. The correct choice of the minimum amount of ventilation cooling airflow makes the best choice in terms of energy. This depends of proper supply air temperature and the actual components that facilitate large variations in airflow and

low supply air temperature.

By using effective exterior shading that is activated at 50 W/m^2 it is found that different zoning of the building has less impact on the results of an energy calculation.

Forord

Denne rapporten er utarbeidet i forbindelse med min masteroppgave ved NTNU våren 2012. I samarbeid med Erichsen & Horgen AS ble oppgaven utformet ved starten av året i Nydalen, Oslo.

Oppgaven omhandler simulering av energiytelse og inneklima i passiv- og lav-energibygg. Denne oppgaven markerer slutten på mange flotte år i Trondheim med mange gode studerende og enda bedre studenter.

Denne anledningen benyttes til å takke mine veiledere: Rasmus Høseggen ved NTNU og Ida Bryn og Ivar Ørnes ved Erichsen & Horgen AS. Arnkell Petersen ved Erichsen & Horgen AS og resten av gjengen i seksjon energi og inneklima skal også ha takk for nyttige tips.

Lina fortjener en spesiell takk fordi hun rett og slett er best. Takk for all støtte!

Kjetil Torset Voldhaug
Oslo, 25.06.2012

Innhold

Sammendrag	i
Forord	iv
Innhold	v
Figurliste	vii
Tabelliste	viii
1 Innledning	1
1.1 Kontekst	1
1.2 Bakgrunn	1
1.3 Motivasjon	1
1.4 Omfang og oppbygning	2
1.5 Mål	3
2 Vurdering av energiytelse og termisk komfort	4
2.1 Vurdering av energiytelse	4
2.2 Vurdering av termisk komfort	7
2.3 Hvordan implementeres vurdering av energiytelse og termisk komfort i norske standarder og forskrifter?	9
2.4 Muligheter og begrensninger med simuleringstøyet IDA ICE 4.2	12
3 Aktuelle systemløsninger og signifikante parametre med betydning for energiytelse og termisk inn klima	14
3.1 Valg av tekniske installasjoner	14
3.2 Valg av bygningsmessige kvaliteter	17
4 Modelloppbygning og simuleringer	19
4.1 Solutsatt sone for analyse av termisk komfort	20
4.2 Modell for studie av minimumsluftmengder i tomme møterom	23
4.3 Modell av hel etasje	23
4.4 Oversikt inndata og samtidighet for simuleringmodeller	26
5 Resultater	31
5.1 Modell for variasjon innad i sone	31
5.2 Modell for variasjon av systemløsninger og settpunkt	34
5.3 Modell for studier av minimumsluftmengder i tomt møterom	41
5.4 Modell av hel etasje	41

6	Diskusjon	44
6.1	Termisk komfort	44
6.2	Modell for hel etasje	49
7	Konklusjon	52
8	Videreføring av arbeidet	54
	Referanser	55
	Vedlegg	I
A	Simuleringshierarkier	II
B	Beregning av pumpeenergi	V

Figurer

1.1	Avvik mellom forventet og målt energibruk til oppvarming. Langseth et al. (2011).	2
2.1	Systemgrenser for energiberegning. Høseggen (2008)	4
2.2	Optimale temperaturer basert på Fangers PMV-modell.	9
2.3	Varighetskurver for operativ temperatur i driftstiden i de filer som ligger til grunn for den norske passivhusstandarden. cite30.	11
4.1	Soneinndeling, orientering og skjerming.	19
4.2	Forenklet 3D-modell av bygningskroppen slik modellert i IDA ICE. Perspektiv sørvest-nordøst. Skjermingen øst for bygget representerer nærliggende bygg.	20
4.3	Utsnitt av sone sør. Modell brukt til analyse av termisk komfort.	21
4.4	Fasadeutforminger	22
4.5	Ulik plassering av bruker for vurdering av variasjon av temperatur innad i sone. Posisjonene er angitt i koordinatene x, y og z(meter). Origo i nedre venstre hjørne.	23
4.6	3D-modell av soneinndelt etasje slik modellert i IDA ICE.	24
4.7	3D-modell av ensone etasje slik modellert i IDA ICE.	25
5.1	Utetemperaturer, vinter og sommer, brukt for simulering av temperaturvariasjon innad i sone.	31
5.2	Operativ temperatur for 3 ulike posisjoner, syntetisk sommerklima, reell fasadeutforming.	32
5.3	Operativ temperatur for 3 ulike posisjoner, syntetisk vinterklima, reell fasadeutforming.	32
5.4	Operativ temperatur for 3 ulike posisjoner, syntetisk sommerklima, alternativ fasadeutforming.	33
5.5	Operativ temperatur for 3 ulike posisjoner, syntetisk vinterklima, alternativ fasadeutforming	33
5.6	Utendørs temperaturforløp, 18.07.2011	34
5.7	Lufttemperatur, solutsatt sone med reell fasadeutforming.	35
5.8	Operativ temperatur, solutsatt sone med reell fasadeutforming.	35
5.9	Lufttemperatur, solutsatt sone med alternativ fasadeutforming.	36
5.10	Operativ temperatur, solutsatt sone med alternativ fasadeutforming.	36
5.11	Tilluftstemperaturer	37
5.12	Tilluftstemperaturer	37
5.13	Tilluftstemperaturer	38
5.14	Tilluftstemperaturer	38
5.15	Luftmengder tilført, uten nattventilasjon, reell fasadeutforming	39
5.16	Luftmengder tilført, med nattventilasjon, reell fasadeutforming	39
5.17	Luftmengder tilført, uten nattventilasjon, alternativ fasadeutforming	40

5.18	Luftmengder tilført, med nattventilasjon, alternativ fasadeutforming	40
5.19	Lufttemperatur og operativ temperatur, tomt møterom ved ulike minimumsluftmengder.	41
5.20	Spesifikt netto energibehov og maksimal gjennomsnittlig operativ temperatur ved settpunkt 22°C. Fordelt på kategorier etter energibudsjett	42
5.21	Spesifikt netto energibehov og maksimal gjennomsnittlig operativ temperatur ved settpunkt 26°C. Fordelt på kategorier etter energibudsjett	42
5.22	Oppsummert spesifikt netto energibehov for hele etasjen	43
5.23	Spesifikt netto energibehov for hele etasjen ved ulike minimumsluftmengder	43
A.1	Simuleringshierarki for reell fasadeutforming	II
A.2	Simuleringshierarki for alternativ fasadeutforming	III
A.3	Simuleringshierarki for simulering av hele etasjen	IV

Tabeller

2.1	Krav til bygningsdeler, komponenter og lekkasjetall. Dokka et al. (2009). <i>Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10)</i> (2010). . .	5
2.2	Kriterier for netto energibehov til oppvarming og kjøling, samt varmetapstall, yrkesbygg. Dokka et al. (2009).	6
2.3	Netto energibudsjett. <i>NS 3031</i> (2007).	6
2.4	Anbefalte intervaller for operativ temperatur. Arbeidstilsynet (2006). *Uten beskyttelse av fingrene	8
2.5	Inndeling av termisk innemiljø i tre kategorier. <i>NS-EN ISO 7730</i> (2006)	8
3.1	Faktorer som er knyttet til energiytelsen i et bygg. Voldhaug (2011).	14
4.1	Oversikt benevning av modeller	21
4.2	Oversikt benevning av modeller	24
4.3	Inndata, bygningskropp. *Se tabell 4.5 for inndata for de to ulike fasadeutformingene	26
4.4	Inndata, fasadeutforming. *Settpunktet til solavskjermingen settes for innstrålt effekt på innsiden av glassflaten.	27
4.5	Nøkkeltall for reell og alternativ fasadeutforming som er brukt i modellen Klimasone.	27
4.6	Internlaster [W/m ²]. Verdiene for PH, og TEK er gjennomsnittlige verdier, mens for R vises installert effekt basert på prosjekterte verdier.	27
4.7	Internlaster modell R, fordelt på soner [W/m ²].	28
4.8	Tilluftstemperaturer [°C]	28

4.9	Luftmengder [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$]. *Se tabell 4.10 for variasjon av minimumsluftmengder	29
4.10	Ulike minimumsluftmengder studert for modell R.B [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$]. *0,7 gjelder for støttearealer og møteromskjerne, øvrige soner har 4 som minimumsmengde.	29
4.11	Ulike minimumsluftmengder studert for modell Møterom [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$].	29
4.12	Settpunkter for kjøling og oppvarming [$^{\circ}\text{C}$]. <i>NS 3031</i> (2007)	29
4.13	Inndata, andre komponenter. Dokka et al. (2009); <i>NS 3031</i> (2007); <i>Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10)</i> (2010).	29
4.14	Driftstider, ventilasjon og internlaster. Alle driftstider gjelder mandag-fredag hele året, med unntak av nattventilasjon som også benyttes i helger.	30
4.15	Beregningsmodell og samtidighet. *Årssimulering ikke gjennomført.	30

1 Innledning

1.1 Kontekst

Denne masteroppgaven tar plass i en tid der energieffektivisering er et høyt aktuelt og mye diskutert tema. Med regjeringens klimamelding kom beskjeden om at energikravene i teknisk byggforskrift skal skjerpes til passivhusnivå allerede i 2015. Bygg står for ca. 40 % av stasjonær energiomsetning, og energieffektivisering av bygg vil gi sterke bidrag til redusert energibruk og redusert utslipp av drivhusgasser på et globalt nivå. Samtidig skal byggets inneklima gi brukerne et tilfredsstillende nivå av termisk komfort.

Bygg bygges først og fremst for å gi trygghet og komfort til folk som lever, jobber og samhandler i dem. Dette gjør godt innemiljø til et primært mål i en byggeprosess, og må ikke komme i skyggen av byggets energiytelse.

Det er med andre ord behov for smarte, integrerte løsninger som kan jobbe sammen og oppnå de målene man setter for et bygg, både på energisiden og for å tilby et godt innemiljø. Denne oppgaven belyser enkelte deler av denne problemstillingen.

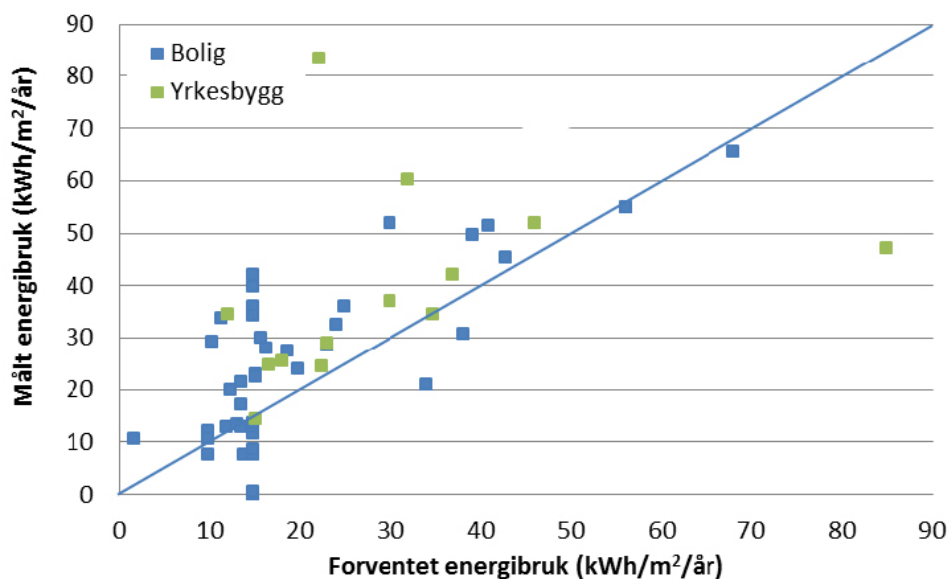
1.2 Bakgrunn

Høsten 2011 ble det gjennomført en prosjektoppgave av forfatteren som vurderte to simuleringsverktøy med tanke på deres evne til å simulere og vurdere et byggs energiytelse og termisk komfort. Forlengelsen av den prosjektoppgaven er representert i arbeidet som er gjort her. I denne masteroppgaven brukes verktøyet IDA ICE 4.2 for å vurdere ulike systemløsninger opp mot termisk komfort og energiytelse. Dette verktøyet ble i 2011 vurdert av forfatteren til å være det best egnede til dette.

En undersøkelse av Langseth et al. (2011) ble benyttet som tankevekker til prosjektoppgaven høsten 2011, og er fortsatt relevant med tanke på å øke bevisstheten rundt bruk av simuleringsprogrammer for beregning av bygningers energiytelse. Figur 1.1 viser flere påfallende avvik mellom forventet og målt energibruk til oppvarming for en rekke passivhus i Norge, Sverige, Tyskland, Østerrike og Sveits. Simuleringsprogrammer benyttes i økende grad under prosjektering av bygg, men kvaliteten på resultatene er imidlertid ikke bedre enn inndata som benyttes. Derfor er det viktig med god kompetanse ved bruk av simuleringsprogrammer.

1.3 Motivasjon

Det benyttes i dag en rekke standarder for prosjektering av bygg. Flere energi- og inneklimasimuleringer legges til grunn for veiledende verdier for inndata, og det er



Figur 1.1: Avvik mellom forventet og målt energibruk til oppvarming. Langseth et al. (2011).

nødvendig å være kritisk til hvordan man benytter seg av disse i simuleringer og byggprosjektering generelt.

Slikt sett er denne oppgaven en fordypning i simulering i seg selv samtidig som den gir teoretisk kunnskap om ulike systemløsninger med tanke på energiytelse og inneklimate. Dette er kunnskap og erfaring som kommer godt med i en jobb som sivilingeniør.

1.4 Omfang og oppbygning

Voldhaug (2011) gir en rekke forslag til videreføring av fordypningsprosjektets arbeid. Av problemstillingene som denne masteroppgaven berører er:

- Foreslå systemløsninger og systemparametre som egner seg best i forhold til å oppnå et lavt energibehov samtidig som et godt inneklimate ivaretas.
- Analysere hvordan ulike krav til inneklimate påvirker energibruken i bygget.
- Angir dagens standarder, forskrifter og veiledninger inneklimateparametre som fører til et tilfredsstillende inneklimate?

Oppgaven starter innledningsvis med å diskutere vurdering av energiytelse og termisk komfort og deretter velges aktuelle systemløsninger og parametre som skal

vurderes under simuleringer. Disse er av både passiv og aktiv art. Deretter presenteres oppbygning av simuleringsmodeller og hvilke simuleringer som skal gjennomføres. Modellene er basert på modellen som er utarbeidet i Voldhaug (2011). Til slutt følger resultatene fra simuleringene og diskusjonen av disse.

I oppgaveteksten står det at det skal etableres simuleringsmodeller for to passivhus av ulik utforming. Det ble imidlertid besluttet i råd med veileder at rapporten i stedet kun skal ta for seg et bygg, da dette gir mulighet for mer dybde i analysedelen og større faglig utbytte.

1.5 Mål

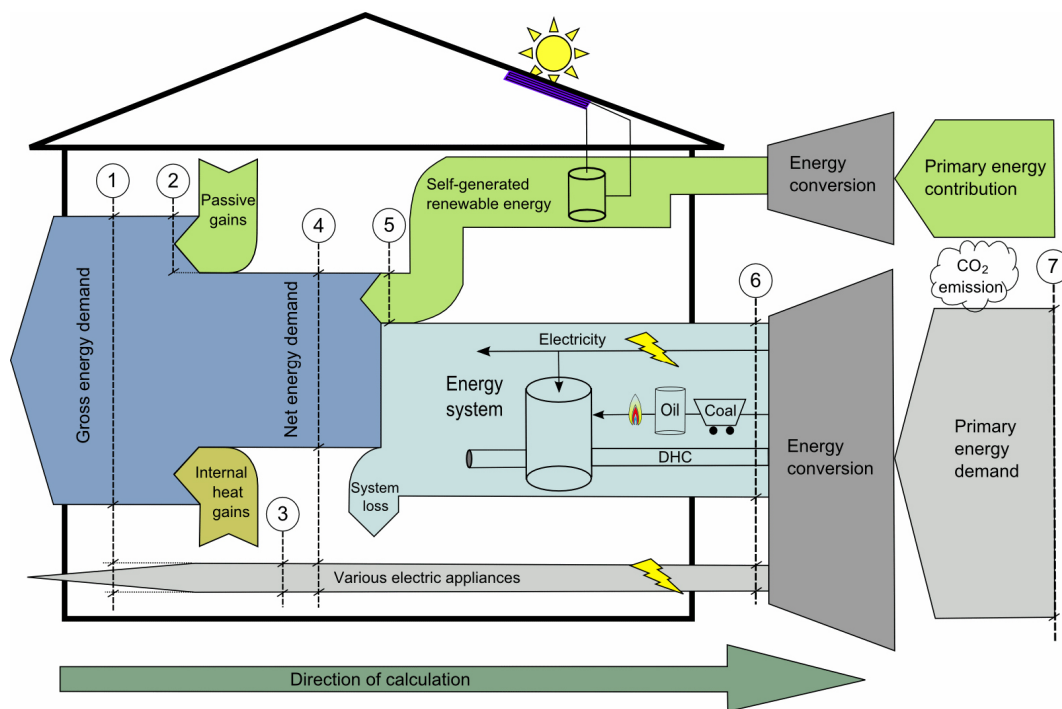
Målet med oppgaven er å komme fram til en anbefaling av en systemløsning som gir tilfredsstillende termisk komfort samtidig som den gir bygget god energiytelse. Resultatene som skal utarbeides vil også kunne si noe om hvordan ulike systemløsninger og parametre påvirker termisk komfort og netto energibehov, samt hvordan beregningsresultater påvirkes av ulike valg av soneutforming og bruk av standardiserte eller reelle inndata.

2 Vurdering av energiytelse og termisk komfort

For å vite hvilke resultater man er ute etter av en simulering, er det viktig å tidlig være bevisst på hvordan en skal vurdere energiytelse og termisk komfort. Her presenteres en del momenter om hva som er viktig og hvilke resultater som er mest relevante for denne rapporten.

2.1 Vurdering av energiytelse

Figur 2.1 gjengitt fra Høseggen (2008) viser en bygningskropp og tilhørende systemgrenser for ulike energibegreper. For at resultater skal presenteres og vurderes på en troverdig og oversiktlig måte, er det viktig at begrepene brukes riktig og at de faktisk samsvarer med beregningene som er gjort.



Figur 2.1: Systemgrenser for energiberegning. Høseggen (2008)

'Direction of calculation' angir retningen for hvordan en energiberegning skal gjennomføres. Den starter med bygningskroppen og dets varmetap, og utvides videre med passive og interne tilskudd, energisystemer, tilførsel av lokalt generert fornybar energi, energikonvertering, energitap og ender med byggets primærenergi-behov.

Jo lenger til høyre man kommer i figuren, jo flere faktorer skal man altså ta hensyn til for å komme fram til et resultat.

Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10) (2010) stiller krav til netto energibehov (i figuren *Net energy demand*, grensesnitt nr. 4) for et bygg. Standarder og veiledninger for passiv- og lavenergibygg oppgir krav til maksimalt netto kjøle- og oppvarmingsbehov, samt krav til varmetapstall. For å møte disse kravene kreves en god bygningskropp med lave U-verdier, lavt lekkasjetall og effektiv varmegjenvinning av ventilasjonsluft. I SINTEF Prosjektrapport 42 av Dokka et al. (2009) er det satt opp kriterier for bygningsfysikk og installasjoner i passivhus. Tabell 2.1 viser de ulike kravene som stilles til passivhus og lavenergibygg i yrkesbyggkategorien, samt kravene *Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10)* (2010) stiller til bygningskroppen. Tabell 2.2 viser kriteriene som er stilt av Dokka et al. (2009) for netto energibehov til oppvarming og kjøling, samt varmetapstall.

Egenskap	Passivhus	Lavenergibygg	TEK10
U-verdi yttervegg [W/m ² K]	≤ 0,15	≤ 0,18	≤ 0,18
U-verdi gulv [W/m ² K]	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,15
U-verdi tak [W/m ² K]	≤ 0,13	≤ 0,13	≤ 0,13
U-verdi vindu [W/m ² K]	≤ 0,80	≤ 1,2	≤ 1,2
U-verdi dør [W/m ² K]	≤ 0,80	≤ 1,2	≤ 1,2
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,06
Virkningsgrad varmegjenvinner [%]	≥ 80	≥ 70	≥ 80
SFP-faktor ventilasjonsanlegg [kW/(m ³ /s)]	≤ 1,5	≤ 2,0	≤ 2,0
Lekkasjetall ved 50 Pa, n ₅₀ [h ⁻¹]	≤ 0,60	≤ 1,5	≤ 1,5

Tabell 2.1: *Krav til bygningsdeler, komponenter og lekkasjetall. Dokka et al. (2009). Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10) (2010).*

Ved å sette krav lenger ut i energikjeden uten krav til netto energibehov, får utbygger mulighet til å satse mer på effektive energisystemer uten nødvendigvis å inkludere smarte løsninger for bygningskroppen. Bygningskroppen har imidlertid lengre levetid enn de tekniske installasjonene i seg, og bør derfor prioriteres.

Primærenergi er likevel et viktig moment når en skal ta for seg en bygnings innvirkning på miljø.

NS 3031 (2007) er den mest brukte standarden for beregning av netto energibehov. Standarden presenterer resultatene med et energibudsjett slik det er vist i tabell 2.3.

Denne måten å presentere resultater på er oversiktlig og gir et godt sammenlikningsgrunnlag for å analysere energiytelsen til ulike modeller av et bygg. Det er også den metoden som er brukt mest i Norge. Dette prosjektet vil begrense seg til netto energibehov ved vurdering av energiytelse.

Byggkategori	Oppvarming, [kWh/m ² år]	Kjøling [kWh/m ² år]	Varmetapstall [W/m ² K]
Barnehage	25	0	0,60
Kontorbygg	15	10	0,50
Skolebygg	15	0	0,50
Universitets- og høyskolebygg	15	10	0,50
Sykehus	20	20	0,75
Sykehjem	15	10	0,65
Hoteller	20	10	0,65
Idrettsbygg	25	10	0,70
Forretningsbygg	20	20	0,65
Kulturbygg	25	10	0,50
Lett industri, verksted	25	10	0,55

Tabell 2.2: Kriterier for netto energibehov til oppvarming og kjøling, samt varmetapstall, yrkesbygg. Dokka et al. (2009).

Energipost	Energibehov kWh/år	Spesifikt energibehov kWh/m ² år
1a Romoppvarming		
1b Ventilasjonvarme		
2 Varmtvann		
3a Vifter		
3b Pumper		
4 Belysning		
5 Teknisk utstyr		
6a Romkjøling		
6b Ventilasjonkjøling		
Totalt netto energibehov, sum 1-6		

Tabell 2.3: Netto energibudsjett. NS 3031 (2007).

2.2 Vurdering av termisk komfort

Termisk komfort defineres som en sinnstilstand som uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelser. §13-4 i *TEK10 (2010)* sier følgende om termisk inneklima.

Termisk inneklima i rom for varig opphold skal tilrettelegges ut fra hensyn til helse og tilfredsstillende komfort ved forutsatt bruk.

Det er altså ikke lovpålagt å dokumentere termisk komfort slik det er for bygningers energiytelse. Det er imidlertid flere standarder som gir veiledning på hva som gir et godt termisk inneklima. Eksempler på disse er *NS-EN ISO 7730 (2006)* og *NS-EN 15251 (2007)*. Disse bygger på teorier fra Fanger (1970) som er utledet fra en beregning av kroppens varmebalanse. Faktorer som påvirker opplevelsen av termisk komfort er oppsummeres som:

- Temperaturforhold;
- Lufthastighet og turbulens;
- Luftens vandampinnhold;
- Kroppens aktivitetsnivå og bekledding.

Hvordan vurderingen av termisk komfort skjer er avhengig av benyttet verktøy. Denne rapporten vil hovedsakelig se på temperaturforhold. Å kunne forutse tilnærmet nøyaktige luftstrømmer, hastighet og turbulens i en sone vil kreve detaljerte CFD-simuleringer. Simuleringsverktøyet IDA ICE 4.2 som brukes i dette prosjektet har ikke slike muligheter.

Termisk komfort skal i denne rapporten imidlertid vurderes for kategorien kontorbygg. Det antas flere forenklinger når det gjelder termiske forhold. Det antas at aktivitetsnivå og bekledding er likt for alle byggets brukere. Lufthastighet, vandampinnhold og turbulens vil ikke bli studert, og antas og holde tilfredsstillende verdier.

Temperaturforhold varierer mye i løpet av en dag, og har mye å si for en persons opplevelse av termisk komfort. Fang et al. (1998) har også vist at lufttemperatur er en av parametrene som har størst innvirkning på opplevd luftkvalitet. I tillegg påvirker ulike settpunkt for temperatur byggets netto energibehov. Derfor vil temperaturforhold være den parameteren som er mest relevant å vurdere i denne rapporten. Resultater som er relevante å få ut av en simulering er lufttemperatur og operativ temperatur for en gitt sone, tilluftstemperaturer og i noen tilfeller overflatetemperaturer.

2.2.1 Hva er den optimale temperaturen?

Temperaturforhold har stor innvirkning på produktiviteten i et bygg. Seppänen (2008) har studert en rekke kvantitative forhold mellom innemiljø, helse og produktivitet i kontorbygg. Blant konklusjonene som ble gjort om termiske forhold, er den at optimal produktivitet oppnås når lufttemperaturen holdes mellom 20 og 24°C.

Arbeidstilsynet (2006) gir en anbefaling på operativ temperatur og hvor denne skal ligge for ulike aktivitetsgrupper. Verdiene er vist i tabell 2.4

Aktivitetsgruppe	Lett arbeid	Middels tungt arbeid	Tungt arbeid
Operativ temperatur [°C]	19-26	16-26	10*-26

Tabell 2.4: Anbefalte intervaller for operativ temperatur. Arbeidstilsynet (2006). *Uten beskyttelse av fingrene

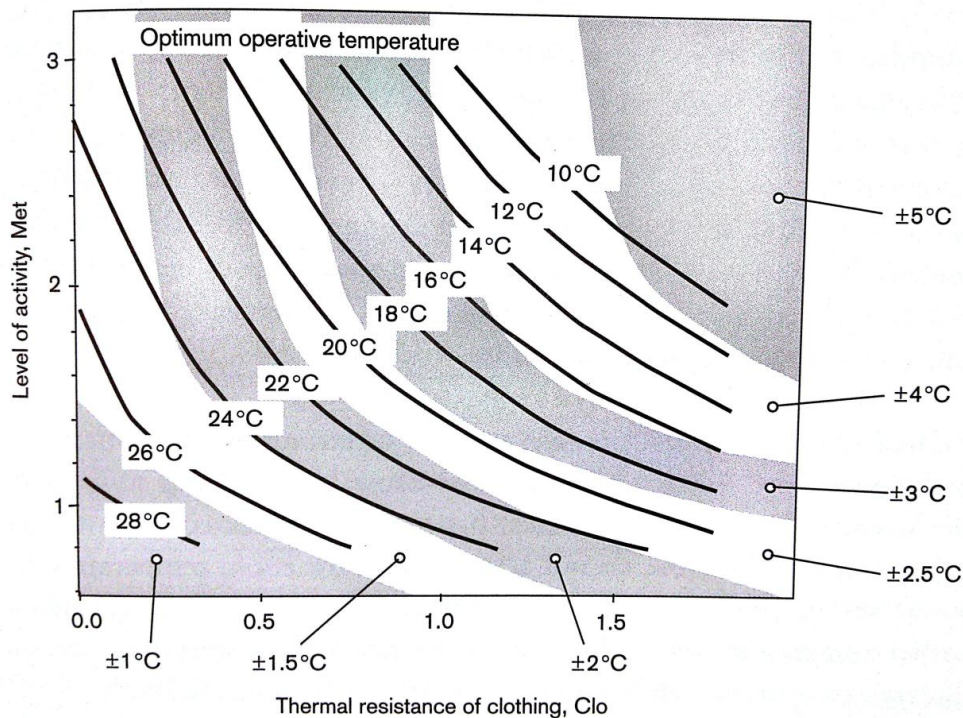
Vedlegg A i *NS-EN ISO 7730* (2006) deler termisk innemiljø i tre kategorier, basert på ulike kriterier. Kategoriene er vist i tabell 2.5.

Category	Thermal state of the body as a whole		Local discomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				vertical air temperature difference	warm or cool floor	radiant asymmetry
A	< 6	-0,2 < PMV < +0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	-0,5 < PMV < +0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	-0,7 < PMV < +0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Tabell 2.5: Inndeling av termisk innemiljø i tre kategorier. *NS-EN ISO 7730* (2006)

For en gitt kategori finnes det for et gitt rom en optimal operativ temperatur som tilsvarer $PMV = 0$, avhengig av aktivitet og bekledding. Forskjellen på kategoriene er i hovedsak hvor store avvik fra denne temperaturen brukerne vil akseptere, basert på PPD-verdien. Figur 2.2 viser temperaturkurver for kategori B. Det henvises til Voldhaug (2011) for ytterligere forklaring av PMV- og PPD-begrepene.

For kontorbygg, der aktivitet og bekledding ligger vanligvis rundt 1,2 met og 1,0 clo, vil optimal operativ temperatur ligge på 22°C. Dette punktet ligger i den grå sonen som indikerer at det aksepteres et avvik på inntil $\pm 2^\circ\text{C}$. For en annen kategori ville temperaturen være den samme, men akseptert avvik ville



Figur 2.2: Optimalle temperaturer basert på Fangers PMV-modell.

vært mindre eller større ettersom det velges en henholdsvis bedre eller dårligere kategori.

2.3 Hvordan implementeres vurdering av energiytelse og termisk komfort i norske standarder og forskrifter?

Med tanke på at denne rapporten blant annet skal belyse eventuelle årsaker til forskjeller mellom beregnet og målt energibruk, kan det være interessant å se på hvilke kriterier for termisk komfort som legges til grunn for energiberegninger i norske standarder.

Ulike kriterier for termisk komfort kan påvirke energiberegningene betydelig. Eksempler kan være hvordan settpunkter for temperaturer er satt for ulike installasjoner eller hvordan simuleringer og beregninger som ligger bak eventuelle kriterier er gjennomført. Det er ikke gjennomført noen dybdestudie av standardene, men enkelte relevante eksempler trekkes fram her.

NS 3031 (2007) gir for eksempel ved bruk av lokal romkjøling et krav til settpunkt på 22°C. For ventilasjonskjøling derimot, som hyppig benyttes i kontorbygg, er det ikke satt noen krav til settpunkt. Dette hindrer ikke at for eksempel en be-

regning kan gjennomføres med 26°C som settpunkt, mens det i realiteten mest sannsynlig vil kjøles ned mot et settpunkt på 22°C.

Videre kan veiledende verdier for internlaster være årsak til avvik mellom beregnet og målt energibehov. Verdier som vises til i *NS 3031* (2007) er gjennomsnittsverdier for hele bruksarealet til et bygg under hele driftstiden (i standarden 12 timer). Datautstyr, belysning og personer kan i virkeligheten avgi mer varme for eksempel i cellekontor med mye datautstyr eller i møterom der persontettheten kan bli høy. Dette har innvirkning på de individuelle soners effektbehov. Dette gjør det også viktig å skille mellom energiberegninger og effektberegninger.

Et annet punkt er hvordan soneinndeling av et bygg gjøres under en beregning. *NS 3031* (2007) angir en rekke forhold som bestemmer hvordan bygget skal inndeles i soner:

- Flerfunksjonsbygninger;
- Ulike tekniske installasjoner som betjener ulike deler av et bygg;
- Ulikt soltilskudd i forskjellige deler av bygningen;
- Ulike interne varmetilskudd i forskjellige deler av bygningen.

Det kan være interessant å undersøke hvordan ulike soneinndelinger påvirker beregnet energibehov. Noen bygg energiberegnes som en sone, fordi det antas at solavskjermingen eliminerer behovet for å dele inn bygget etter ulik innstrålt sol-effekt. Dette tillates også i *NS 3031* (2007) for bygninger med moderat vindus- og glassareal og effektiv utvendig solavskjerming. Dersom produktet av arealandelen dører/vinduer/glassfelt og total solfaktor for vindu overskrider 5%, stilles det egne krav til hvordan bygningen skal deles inn i soner.

Bygninger med solskjerming beregnes imidlertid gjerne med aktivering av solskjerming ved en gitt konstant grenseverdi for innstrålt soleffekt. I virkeligheten vil aktivering av solskjerming være avhengig av det faktiske styresystemet, eller solskjerming kan ha manuell betjening. Dette kan også være årsak til avvik mellom beregnet og målt energibruk.

Av *Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10)* (2010) stilles det forøvrig minstekrav til fasadeutforming. §14-5(3) sier følgende om dette:

a) U-verdi for glass/vindu/dør inkludert karm/ramme multiplisert med andel vindus- og dørareal av bygningens oppvarmede BRA skal være mindre enn 0,24.

b) Total solfaktor for glass/vindu (g_t) skal være mindre enn 0,15 på solbelastet fasade, med mindre det kan dokumenteres at bygningen ikke har kjølebehov.

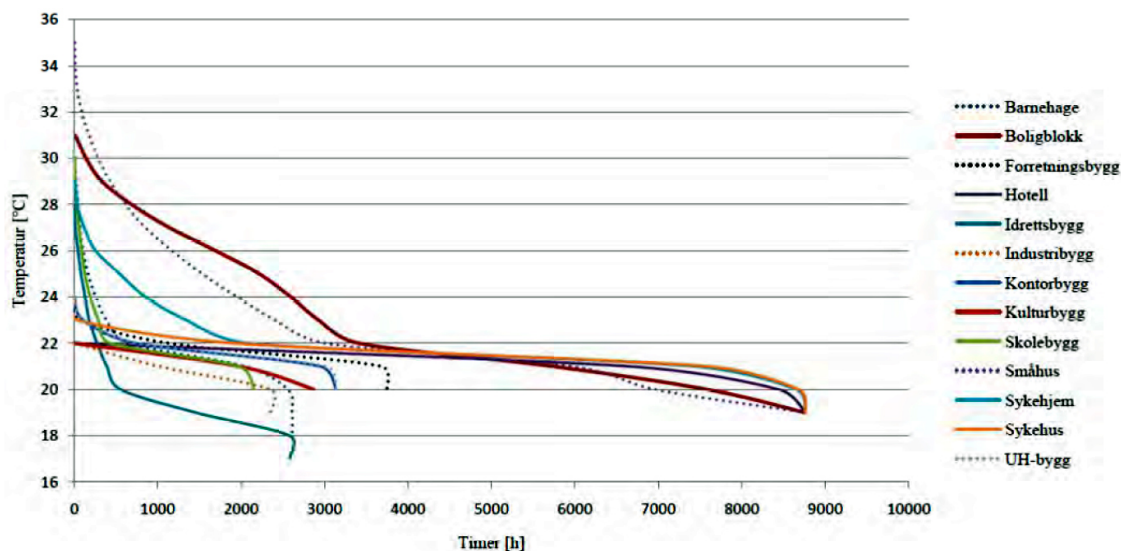
Angående ledd 3b, antas det i denne rapporten at det med 'total solfaktor for glass/vindu' menes total solfaktor for glass/vindu inkludert solavskjerming, i og med at det ikke er kjent at glass/vindu i seg selv kan oppnå en total solfaktor på 0,15.

SINTEF Prosjektrapport 42 av Dokka et al. (2009) er en rapport som allerede har blitt brukt i flere passivhusprosjekter i Norge. Rapporten danner basis til en kommende ny norsk standard *NS3701 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - yrkesbygninger*. Denne standarden har nylig vært ute til høring og gis ut i løpet av 2012. Noen momenter ved denne rapporten bør også nevnes.

Figur 2.3 viser varigheten på operative temperaturer i filene som ligger til grunn for kriteriene som skal stilles i den nye norske passivhusstandard. Basert på kriteriene for komfort som er beskrevet i seksjon 2.2.1, kan det sies at flere kategorier ligger godt over komfortnivå i lengre perioder.

Dersom kurvene som holder relativt høye temperaturer brukes som grunnlag for en energiberegning, vil resultatet bli et lavere energibehov enn i virkeligheten, da brukerne av bygget etter all sannsynlighet vil gjøre tiltak for å få temperaturforholdene ned til et komfortabelt nivå. Dette kan for eksempel være vinduslufting, nedjustering av settpunkt for kjøling eller etterinstallering av kjøleenheter.

Standarder for energiberegninger som skal etableres i bruk og som senere kan bli brukt for å imøtekomme påbudte minstekrav i en forskrift bør være konsistente med forutsetninger for godt inneklima. Hvis ikke vil det fortsatt oppstå flere avvik mellom beregnet og målt energibehov.



Figur 2.3: Varighetskurver for operativ temperatur i driftstiden i de filer som ligger til grunn for den norske passivhusstandard. cite30.

2.4 Muligheter og begrensninger med simuleringsverktøyet IDA ICE 4.2

IDA ICE 4.2 gir valget om å kunne benytte seg av to forskjellige beregningsmodeller, *energy* og *climate*. Ved utforming og bruk av et simuleringsprogram vil en til en hver tid stå ovenfor en tradeoff mellom nøyaktighet og simuleringstid. Med disse to modellene gir IDA ICE brukeren fleksibilitet med tanke på dette. Noen momenter ved modellene som en bruker av programmet bør være klar over er beskrevet under.

2.4.1 *Energy*-modellen i IDA ICE

Energy-modellen er alternativet for raskere simuleringshastighet og mindre nøyaktighet. Modellen er egnet til å brukes ved årssimuleringer og simuleringer satt sammen av mange soner. For hver sone regnes det ut en gjennomsnittlig operativ temperatur slik som vist i formel 2.1.

$$t_{op} = 0.5 \cdot (t_{air,mean} + t_{Mrt}) \quad (2.1)$$

der:

t_{op}		Gjennomsnittlig operativ temperatur [°C]
$t_{air,mean}$		Middellufttemperatur [°C]
t_{Mrt}		Middelstrålingstemperatur [°C]

Modellen studeres ikke i dybden her, men et viktig poeng som bør tas med er at energy-modellen beregner middelstrålingstemperaturen basert på en varmebalanse som kun inkluderer langbølget varmestråling fra internlast og overflater mot det fri. Middelstrålingstemperaturen er også uavhengig av plassering i rommet, og det er en gjennomsnittsverdi som beregnes. Derfor er det også en gjennomsnittsverdi for operativ temperatur i sonen som er resultatet.

Det tas altså ikke hensyn til direkte solstråling på brukeren, kun sekundær stråling via flater og solavskjerming. I direkte sollys vil altså den operative temperaturen være høyere enn det beregningene gir uttrykk for.

2.4.2 *Climate*-modellen i IDA ICE

Climate er den mer nøyaktige modellen, som fortrinnsvis skal brukes ved vurdering av termisk komfort. Climate-modellen gjør en mulig til å kunne vurdere termisk komfort ulike steder i sonen i en mer nøyaktig grad enn energy-modellen. For et gitt punkt beregnes operativ temperatur som gitt i formel 2.2.

$$t_{op} = 0.5 \cdot (t_{AirOp} + t_{MrtOp}) \quad (2.2)$$

der:

t_{op}	Gjennomsnittlig operativ temperatur for det operative punkt [°C]
t_{AirOp}	Lufttemperatur i operativt punkt [°C]
t_{MrtOp}	Strålingstemperatur for det operative punkt [°C]

Beregning av strålingstemperaturen for det operative punkt er basert på vinkelforholdet mellom overflaten og en uendelig liten kube i det operative punkt. Vinkelforholdet mellom kubene og parallelle overflater, samt overflater rett foran kubene beregnes. Metoden har imidlertid følgende begrensninger:

- Alle overflatene må være rektangulære;
- Alle overflatene må se hverandre; og
- Hindringer inkluderes ikke.

Modellen kan altså kun brukes på firkantede utformede soner. I likhet med energy-modellen tar heller ikke climate-modellen hensyn til direkte solstråling på brukeren ved beregning av operativ temperatur. Også her vil operativ temperatur for et punkt i direkte sollys være høyere enn beregnet. Dette er et viktig poeng som man må ha i tankene ved gjennomføring av en simulering.

2.4.3 Validering av IDA ICE

IDA ICE er validert etter følgende standarder:

- Thermal performance of buildings - Sensible room cooling load calculation - General criteria and validation procedures (EN 15255-2007)
- Thermal performance of buildings - Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods - General criteria and validation procedures (EN 15265-2007)

NS 3031 (2007) krever at simuleringsprogrammer som brukes til energiberegninger er validert etter EN 15265. Poenget med valideringen er at programmets beregningsmodeller skal gi akseptable resultater i forhold til referansemødelene som er utarbeidet for standardene.

Valideringen av IDA ICE er beskrevet i *EQUA Simulation AB* (2010).

3 Aktuelle systemløsninger og signifikante parametre med betydning for energiytelse og termisk inn klima

I dette kapittelet skal det gjøres et utvalg av en rekke parametere som skal analyseres ved hjelp av simuleringsverktøyet IDA ICE 4.2. Bygningsmessige og tekniske løsninger skal medtas, av både passiv og aktiv art.

I Voldhaug (2011) er det oppsummert flere faktorer som påvirker energiytelsen til et bygg. Disse er gjengitt i tabell 3.1.

Eksternt	Internt	System	Bygningskropp
Orientering	Brukere	VVS	Isolasjon
Geografi	Belysning	Settpunkter	Termisk masse
Topografi	Utstyr	Driftstid	Vinduer
Klima	Soneinndeling	Virkningsgrad	Solavskjerming
Energiforsyning	Luftkvalitet	Distribusjon	Tetthet
	Temperatur	Styring	Farge

Tabell 3.1: Faktorer som er knyttet til energiytelsen i et bygg. Voldhaug (2011).

De fleste av disse faktorene kan representeres som parametre og systemfunksjoner i en simuleringsmodell. Det er imidlertid nødvendig å foreta et begrenset utvalg for å kunne gjøre en oversiktlig presentasjon av resultatene som utarbeides, samt på grunn av tidsbruk under rapportskrivningen. I følgende seksjoner beskrives og begrunnes valgene som er gjort.

3.1 Valg av tekniske installasjoner

Basert på noen momenter som er nevnt i seksjon 2 er det valgt å hovedsakelig ha fokus på følgende systemer og parametre.

- Kjølssystemer
- Nattkjøling
- Settpunkt kjøling

3.1.1 Kjøling i passivhus

Passivhus bygges med tette bygningskropper og lavt varmetap. Disse egenskapene skal redusere byggets behov for oppvarming, men kan også utsette brukerne av bygget for et varmt termisk inn klima, og gjerne over graden av termisk komfort

som er ønskelig. Dette gjelder spesielt yrkesbygg, der mengden internlaster normalt er høye. Derfor vil det ofte være et kjølebehov for bygget. Dokka et al. (2009) har fastsatt et krav om maksimalt kjølebehov for alle yrkesbygg, og kjølebehovet for en gitt kategori kan dekkes av romkjøling og/eller ventilasjonskjøling.

Kjølesystemer medfører ifølge Nilsson (2003) flere utfordringer installasjonsmessig, økonomisk og energimessig enn oppvarmingssystemer. Fordi bygninger med passivhusstandard skal installeres med mest mulig effektive systemer, er det derfor interessant å undersøke ulike måter å fjerne overskuddsvarme på, og innvirkningen av dette på termisk komfort og energiytelse.

Overskuddsvarme kan fjernes fra en sone på hovedsakelig to måter:

- Kjøling med behandlet luft, tilført med en temperatur lavere enn romtemperaturen via byggets ventilasjonssystem; og
- Kjøling i selve rommet ved hjelp av kalde overflater, for eksempel kjølebafler, konvektorer eller fan-coil enheter.

Under beskrives disse noe nærmere.

Ventilasjonskjøling

Førstnevnte oppnås med ventilasjonskjøling. Kjølesystemet er integrert i ventilasjonssystemet, og gir lavere installasjonskostnader og enklere installasjon. Kjølekapasiteten ved omrøring er en funksjon av tilluftstemperaturen og luftmengden som tilføres sonen, og vises i formel 3.1 hentet fra Novakovic et al. (2007).

$$P_{kjøl} = V_s \rho C_p \Delta T \quad (3.1)$$

der:

$P_{kjøl}$	kjølekapasitet [kW]
V_s	tilført luftmengde [m^3/s]
C_p	luftas varmekapasitet [$\text{kJ}/(\text{kgK})$]
ρ	luftens tetthet [kg/m^3]
ΔT	temperaturdifferanse mellom avtrekksluft og tilførselsluft [K]

Det brukes typisk noe høyere luftmengder for ventilasjonskjøling enn ved lokalkjøling, og kanalsystemet kan ta mer plass. Lave temperaturer kan også føre til større risiko for trekk i sonen og ukomfortable temperaturgradienter. Dersom tilluftstemperaturen nærmer seg duggpunktstemperaturen til lufta, vanligvis under 15°C , er det i tillegg fare for at romluft kan kondensere på utsiden av uisolerte ventilasjonskanaler. For at ventilasjonskjøling skal fungere som tiltenkt er det da

nødvendig å ta hensyn til dette med valg av riktig tilførselsmåte og isolering av kanaler.

Tilluftskomponenter med mulighet for lave tilluftstemperaturer og stor variasjon i luftmengde er imidlertid på god vei. Entreprenør for bygget som skal studeres i denne rapporten har valgt å benytte seg av et aktivt tilluftsdon som er i stand til å takle svært lave temperaturer og stor variasjon i luftmengde.

Dette kan imidlertid ved visse forutsetninger føre til for lave temperaturer i enkelte typer rom. Et resonnement som eksempel kan være at det ikke forutsettes oppvarming i kjernen av bygget, fordi det regnes med at nærliggende, varmere soner eller internlaster opprettholder tilstrekkelig termisk komfort i kjernen. Dette blir derimot ikke tilfelle dersom kjernesonen består av for eksempel møterom eller støttearealer, som kan stå tomme i lang tid i løpet av en dag. Tilføres disse sonene luft med temperaturer ned mot 15°C, kan det i verste fall kjøle ned sonen og forårsake termisk diskomfort hos brukerne i det aktuelle rommet tas i bruk.

Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10) (2010) påbyr en minimumsluftmengde på 0,7 m³/m²h for rom som ikke er bruk. Om dette er nok til å forårsake termisk diskomfort i et møterom kan være gjenstand for undersøkelse.

Ventilasjonskjøling regnes uansett som en mer energieffektiv måte å gjennomføre kjøling på. Tilluft må kjøles ned kun når utetemperaturen stiger over den ønskede tilluftstemperaturen. Fordi tilluftstemperaturen er lav kreves det også mindre energi til oppvarming av lufta i kaldt klima.

I IDA ICE håndteres ventilasjonskjøling med styring av tilluftstemperaturer og luftmengder. Settpunkter for VAV kan stilles inn for både temperatur og CO₂. IDA ICE håndterer både full omrøring og fortrenningsventilasjon, men denne rapporten dekker kun scenarier med full omrøring.

Lokal kjøling

I omtale av lokal kjøling skilles det mellom passiv og aktiv kjøling. Passive kjølemetoder benytter seg av naturlig konveksjon, for eksempel ved bruk av nedkjølte konvektorer plassert i tak. En blanding av tilluft fra ventilasjonsanlegget og romluft passerer kjøletaket og kjøles ned.

Aktiv kjøling skjer ved tvungen konveksjon. Komponenter som benytter seg av denne metoden er for eksempel kjøleblaffer og fan-coils. Et nedkjølt arbeidsmedie, i de fleste tilfeller vann, tilføres komponenten, og en vifte trekker romluft gjennom en varmeveksler som reduserer romluftas temperatur. Her gjelder det også å ikke tilføre temperaturer under duggpunktet til lufta, da det blir fare for kondensasjon. Visse systemer lar seg imidlertid til en viss grad å kunne håndtere kondens dersom et riktig utført dreneringssystem er en del av løsningen.

Lokale kjølingsalternativer påvirker termisk komfort i sonen avhengig av hva slags system som brukes og hvor det plasseres.

Energiytelsen til romkjøling påvirkes av temperaturnivåer, utforming av rørnett og eventuelt energibehov til vifter ved bruk av kombibafler eller fan-coils. Bedre energieffektivitet kan blant annet oppnås ved bruk av varmepumper, frikjøling mot uteluft eller utnyttelse av nærliggende vannkilder.

IDA ICE gir muligheter for å benytte seg av vannbårne systemer og plassering av kjølekomponenter en sone. Det er derimot valgt å gå bort i fra dette fordi dimensjonering og oppsett av systemet gjør arbeidet med simuleringsoppsettet mye mer omfattende og tidkrevende. I stedet brukes såkalte *ideelle enheter* som beregner kjølebehovet basert på generell kuldeytelse uten hensyn til distiribusjonssystem og plassering av komponenter.

3.1.2 Settpunkt kjøling

Som nevnt i seksjon 2.3 finnes det muligheter for å beregne bygninger med ventilasjonskjøling med høyere settpunkt enn 22°C. Det er derfor valgt å gjennomføre simuleringer med to ulike settpunkt, 22 og 26°C.

3.1.3 Nattventilasjon

Dersom tilstrekkelig termisk masse er tilgjengelig, kan det å tilføre ubehandlet luft til sonene om natten i varme perioder kan bidra til å senke kjølebehovet. Avhengig av materialers varmekapasitet og termiske effusivitet vil de innvendige overflater blir kjølt ned om natten, og kjøle ned bygget om dagen, når temperaturen i bygget stiger. Dette vil dekke en viss del av byggets kjølebehov som vanligvis ville bli dekket av energikrevende kjølesystemer. Innvendig eksponert termisk masse er også med på å jevne ut temperatursvingninger i bygget.

3.2 Valg av bygningsmessige kvaliteter

Når det gjelder bygningsmessige kvaliteter er det valgt å utforme to ulike fasadeutforminger.

3.2.1 Fasadeutforming

Det kan være interessant å se på ulike andel vindusareal. For eksempel kan det varieres mellom to ulike fasader, der den ene er slik den er prosjektert i virkeligheten, mens den andre nærmer seg for eksempel krav som er satt i TEK10.

Når det gjelder solavskjerming er dette en løsning som brukes på de aller fleste nye bygg, og det stilles også krav til solavskjerming i TEK10 som nevnt i seksjon 2.3. For passivhus er det helt nødvendig med solavskjerming for å redusere soltilskuddet i bygget og dermed tilfredstille kravene som settes til kjølebehov. Bruk av

3 Aktuelle systemløsninger og signifikante parametre med betydning for energiytelse og termisk inneklima

solavskjerming må også veies opp mot utnyttelse av dagslys, men det adresseres ikke i denne rapporten.

I IDA ICE representeres solavskjerming som en multiplikator for vinduets g-verdi. Settpunktet for aktivering av solavskjerming er innstrålt effekt registrert på innsiden av glassflaten.

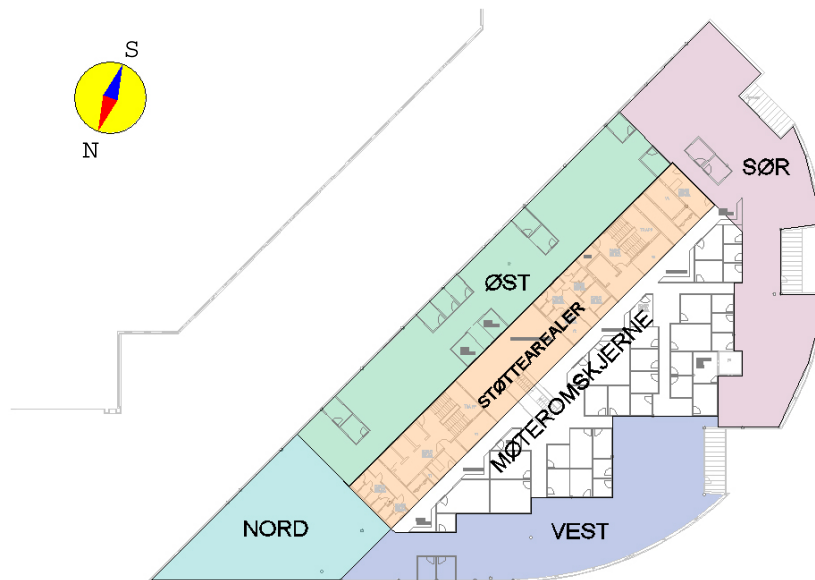
4 Modelloppbygning og simuleringer

Simuleringsprogrammet IDA ICE 4.2 har blitt brukt for å bygge opp en rekke modeller som skal undersøke systemene og parametrene presentert i seksjon 3. Følgende valg av modeller vil bli beskrevet og begrunnet:

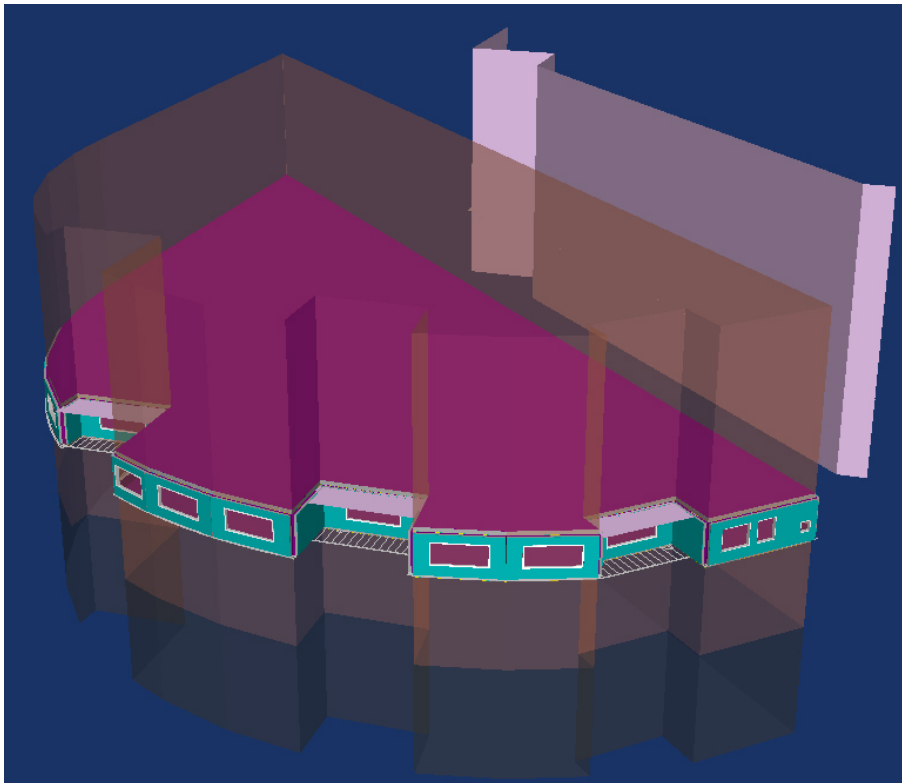
- Solutsatt utsnitt av sone sør
- Møterom i kjernen av bygget
- Flersonemodell av hele etasjen
- Ensonemodell av hele etasjen

For hver modell blir det beskrevet hvilke simuleringer som er gjennomført ved hjelp av simuleringshierarkier. Valg av inndata beskrives og begrunnes. Det har gått mye tid til å forberede simuleringmodellene og til å lage en god oversikt over simuleringene som er gjennomført. Mye av tiden har også blitt brukt til feilsøking og justering av modeller.

De ulike modellene tar utgangspunkt i modellen som er utarbeidet i IDA ICE 4.0 av Voldhaug (2011). Modellen representerer plan 3 i et kontorbygg som er under bygging i Oslo. Denne etasjen er valgt fordi det er en veldig typisk etasje for bygget og den vil være representativ for de fleste av byggets øvrige etasjer. Opprinnelig soneinndeling, orientasjon og skjerming er gitt i figur 4.1. Figur 4.2 viser en forenklet 3D-modell av bygningskroppen.



Figur 4.1: Soneinndeling, orientering og skjerming.



Figur 4.2: Forenklet 3D-modell av bygningskroppen slik modellert i IDA ICE. Perspektiv sørvest-nordøst. Skjermingen øst for bygget representerer nærliggende bygg.

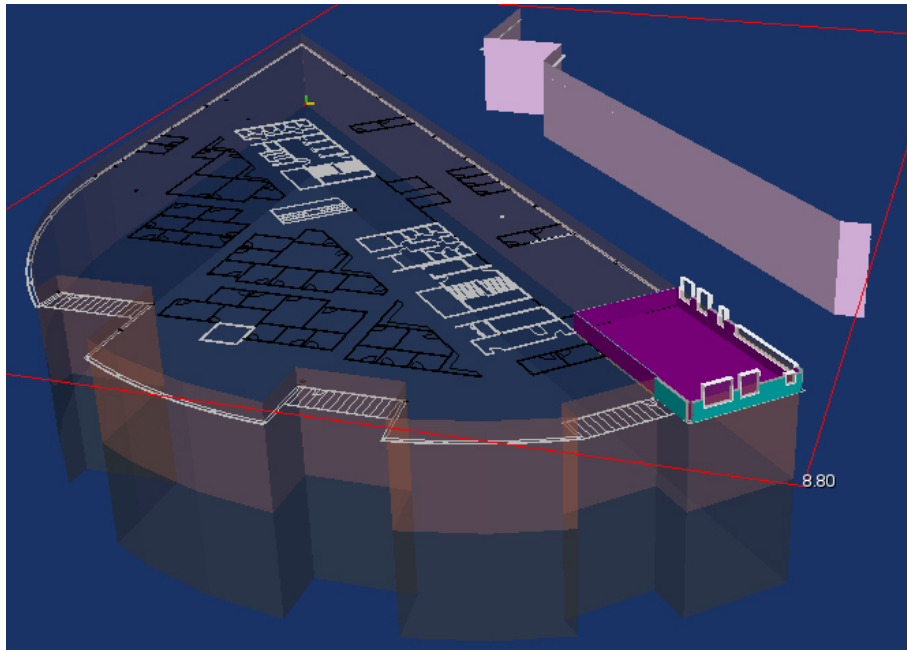
4.1 Solutsatt sone for analyse av termisk komfort

For å analysere ulike kjølesystemer med tanke på termisk komfort vil det være aktuelt å velge et område i bygget som er mer utsatt for varme enn andre. Interne varmelaster vil være høyest i kontorlandskapet, og det vil være naturlig å velge den delen av kontorlandskapet som er mest solutsatt. Sone sør vil motta mest soltilskudd i løpet av en dag, og egner seg derfor til disse simuleringene.

For å få størst mulig nøyaktighet med tanke på termiske forhold ønskes det å bruke *Climate*-modellen for simuleringer i IDA ICE. I og med at det ønskes å se på ulike fasadeutforminger kan det være aktuelt å se på en del av sonen med høy andel av eksterne flater. I dette tilfellet er sonen verken avgrenset til tak mot friluft eller gulv mot grunn, og det kan være et fornuftig valg å undersøke en sone som i befinner seg i et hjørne. Det er dermed valgt å gjøre et rektangulært utsnitt av det sørøstlige hjørnet i sone sør.

Et oversiktsbilde i figur 4.3 viser utsnittet av sonen i forhold til resten av bygget.

Figur 4.4 viser de ulike fasadeutformingene. *Reell fasadeutforming* er basert på dwg-tegninger utarbeidet av *Nydalen Arkitektkontor AS* (2011), med enkelte



Figur 4.3: Utsnitt av sone sør. Modell brukt til analyse av termisk komfort.

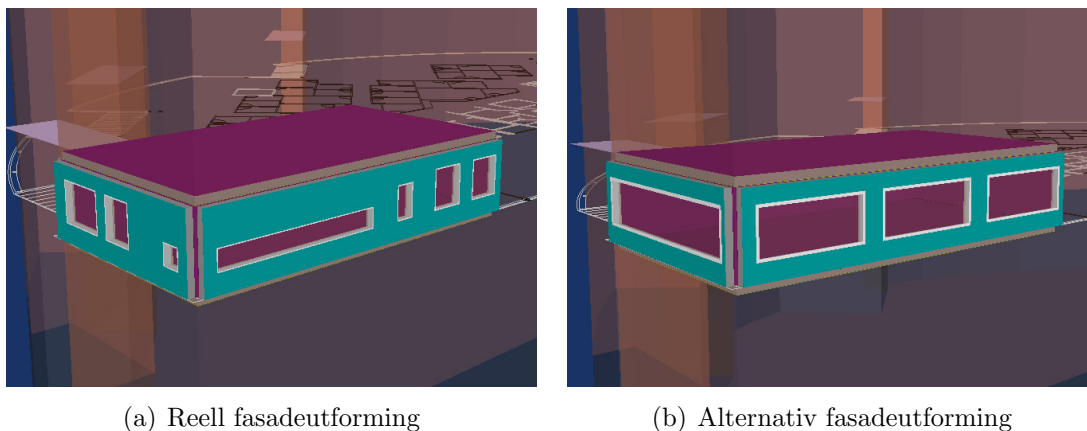
forenklinger. Den alternative fasadeutformingen er fritt utformet og har høyere glassandel og høyere U-verdi, nærmere minstekravet i TEK10. Mer nøyaktig inn-data er beskrevet i seksjon 4.4.

4.1.1 Benevning og simuleringshierarki

For å holde en god oversikt over modellene og resultatene som produseres er det valgt å benevne modellene som vist i tabell 4.1. For simuleringshierarkier henvises det til vedlegg A og figurene A.1 og A.2. Benevnelsen utformes med tre sifre. Modellen A.1a betyr for eksempel reell fasadeutforming uten nattventilasjon med et kjølesettpunkt på 22°C. Det er valgt å benevne modellene på denne måten for å unngå for mye tekst i presentasjon og diskusjon av resultatene.

A	Reell fasade, romkjøling	1	Uten nattventilasjon
B	Reell fasade, ventilasjonskjøling	2	Med nattventilasjon
C	Alt. fasade, romkjøling	a	settpunkt 22°C
D	Alt. fasade, vent.kjøling	b	settpunkt 26°C

Tabell 4.1: Oversikt benevning av modeller



Figur 4.4: *Fasadeutforminger*

4.1.2 Modell for studie av variasjon innad i sone

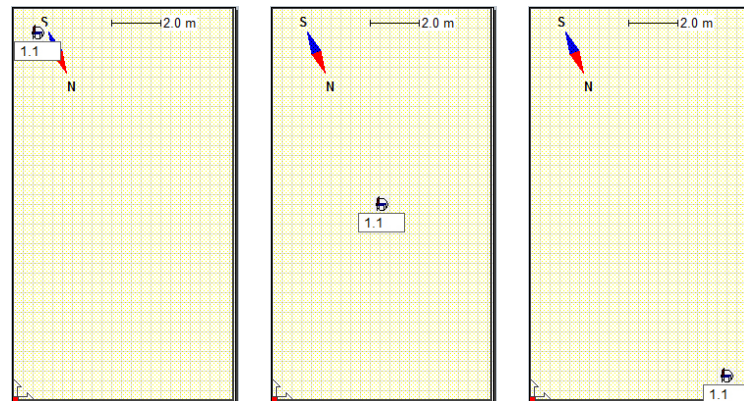
Det er interessant å undersøke hvordan termisk komfort varierer innad i sonen. IDA ICE gjør det mulig å velge den posisjonen der operativ temperatur skal måles. Det er tatt utgangspunkt i tre forskjellige posisjoner, og operativ temperatur gis for hver posisjon under dimensjonerende sommer og vinterforhold. For å unngå for mange modeller og variasjoner er det her valgt å gjennomføre simuleringen kun med romkjøling uten nattventilasjon.

Modellen kan også gi noen svar på om forskjellige fasadeutforminger påvirker temperaturgradient innad i sonen. Uten god solavskjerming vil det mest sannsynlig være stor grad av temperaturvariasjon i sonen i løpet av en dag, avhengig av hvor direkte solinnstråling inntreffer. Fasaden med mest glassandel vil selvfølgelig slippe inn mest solinnstråling, som fører til varmere temperaturer og økt kjølebehov. En mulig hypotese kan være at siden det i modellene benyttes høyeffektiv solavskjerming, er det liten variasjon i temperaturforholdene innenfor fasaden. Dette må imidlertid vurderes opp mot programmets egenskaper til å simulere forholdene korrekt (se seksjon 2.4).

For disse modellene er det valgt å benytte syntetiske klimadata gitt av simuleringprogrammet. Dette gjøres for å simulere under dimensjonerende forhold.

4.1.3 Modell for variasjon av systemløsninger og settpunkt

Denne modellen benyttes for å gjennomføre en rekke simuleringer hvis hensikt er å sammenlikne ulike systemløsninger og parametre beskrevet i seksjon 3. For hver fasadeløsning er det utarbeidet 8 modeller (se vedlegg A for simuleringshierarkier). Av hensyn til tidsbruk, og at det i hovedsak studeres ulike kjølesystemer, er det valgt å kun studere termiske forhold om sommeren ved disse modellene.



(a) Bruker i posisjon 1 (1,15,1.1). (b) Bruker i posisjon 2 (4,5,8,1.1). (c) Bruker i posisjon 3 (8,1,1.1).

Figur 4.5: Ulik plassering av bruker for vurdering av variasjon av temperatur innad i sone. Posisjonene er angitt i koordinatene x , y og z (meter). Origo i nedre venstre hjørne.

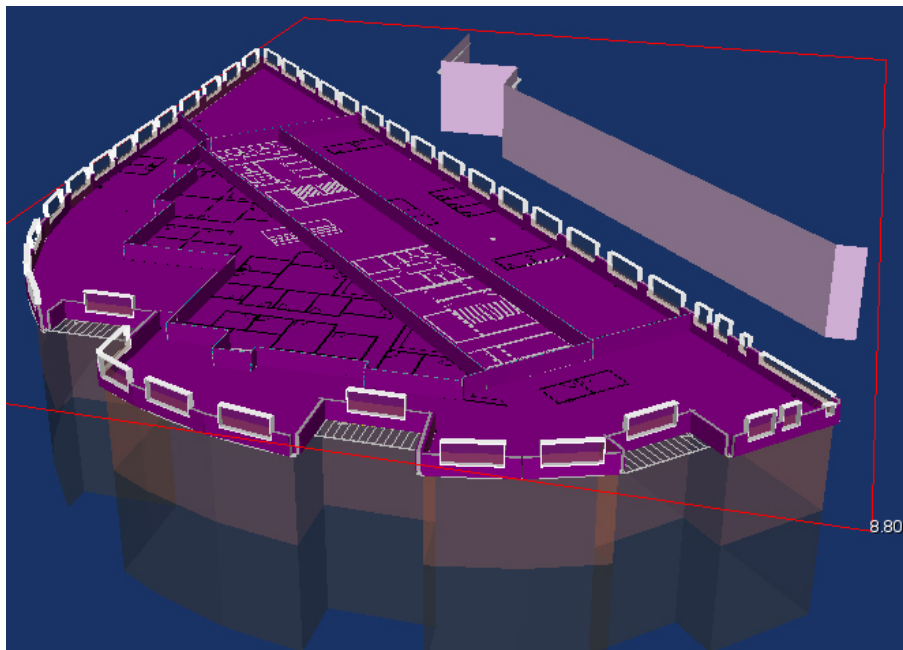
4.2 Modell for studie av minimumsluftmengder i tomme møterom

I seksjon 3.1.1 nevnes noen punkter rundt ventilasjonskjøling og termiske forhold i kjernen av bygget. På bakgrunn av dette er det opprettet en modell av et møterom med ventilasjonskjøling uten installert oppvarming. Det antas adiabatisk internvegger, det vil si ingen varmeovergang til nærliggende rom, bortsett fra en vegg som vender ut mot en tenkt gang der det antas at det befinner seg et sentralavtrekk. Det antas en overflatetemperatur på 25°C på motsatt side av denne vegg.

Dermed utføres en studie av ulike minimumsluftmengder og deres innvirkning på møterommets temperatur dersom det skulle stå uten bruk.

4.3 Modell av hel etasje

En modell av hele etasjen kan gi et mer helhetlig bilde av byggets energibruk enn en enkelt sone. Hensikten med modellene som er bygget opp her er å belyse forskjeller i energibruk ved bruk av ulike inndata og soneinndelinger, samt ulike systemløsninger. Inndataene er ytterligere beskrevet i seksjon 4.4. Modellene settes opp med ulike internlaste fra *NS 3031* (2007), Prosjektrapport 42 og prosjekterte verdier.



Figur 4.6: 3D-modell av soneinndelt etasje slik modellert i IDA ICE.

4.3.1 Benevning og simuleringshierarki

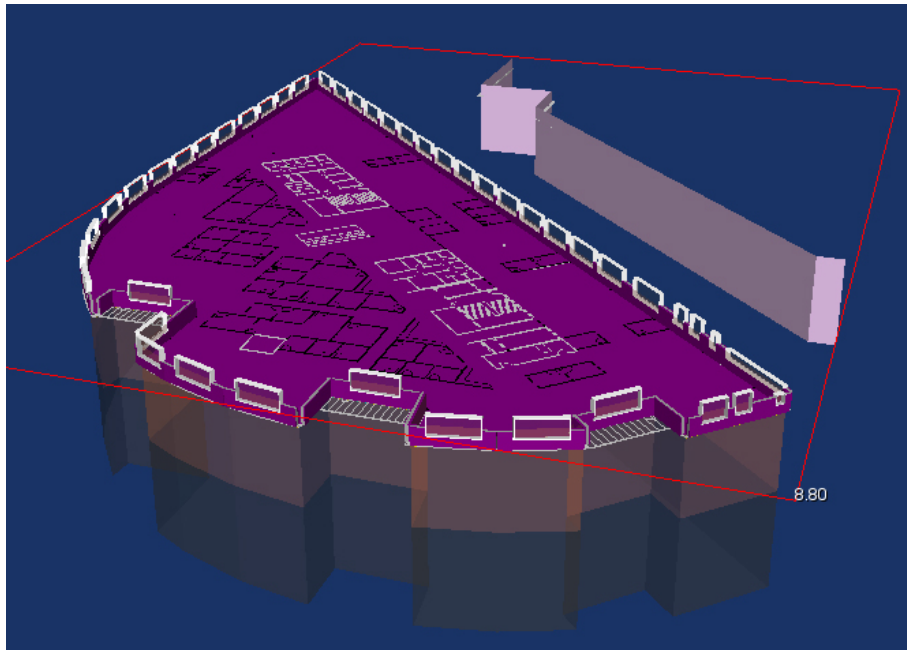
Benevnelser for modellene som er beskrevet i denne seksjonen er vist i tabell 4.2. For simuleringshierarkier henvises det til vedlegg A og figur A.3. I disse simuleringene brukes nattventilasjon og reell fasadeutforming for alle modeller.

R	Reell modell	A	Romkjøling
PH	Passivhus inndata	B	Ventilasjonskjøling
TEK	Referansemodell TEK10 og NS3031	a	settpunkt 22°C
S	Ensonemodell	b	settpunkt 26°C

Tabell 4.2: Oversikt benevning av modeller

4.3.2 Flersonemodell

For modellen med reelle laster varierer internlastene mellom sonene. Modellene med standardiserte inndata har samme internlast for hver sone. Figur 4.6 viser en 3D-visualisering av soneinndelingen.



Figur 4.7: 3D-modell av ensone etasje slik modellert i IDA ICE.

4.3.3 Ensonemodell

Ensonemodellen består av kun en sone som dekker hele etasjen. Hensikten med denne er å se hvordan beregningen påvirkes av ulike soneutforming av etasjen. Dette er kun aktuelt for modeller som brukes standardiserte inndata over hele etasjen, og i dette tilfelle er det lagt en ensonemodell med de samme inndata som flersonemodellen med standardiserte inndata fra Dokka et al. (2009). Figur 4.7 viser en 3D-visualisering av modellen.

4.4 Oversikt inndata og samtidighet for simuleringsmodeller

Inndata er hovedsakelig hentet fra Dokka et al. (2009), *NS 3031* (2007) og fra prosjekterte verdier for bygget. Valgene beskrives kort under. I tabellene brukes samme benevnelse som beskrevet for modellene tidligere. Modellen for utsnittet av sone sør beskrevet i seksjon 4.1.3 blir omtalt som *Klimasone*.

Modellen for møteromsstudier kalles *Møterom*. Denne modellen er en intern sone uten fasader med de samme innvendige kvaliteter som øvrige modeller. Derfor nevnes ikke den i ytterligere grad, annet i tabell 4.11

4.4.1 Bygningskropp

Her brukes samme verdier for modellene klimasone, R og PH. For modellen TEK brukes verdier som er valgt noe bedre enn minstekravene i TEK10.

U-verdi for bygningsdeler:	Enhet	Klimasone	R	PH	TEK
Yttervegg	W/m ²	0,15	0,15	0,15	0,18
Innv. vegg		0,6	0,6	0,6	0,6
Etasjeskiller		1,4	1,4	1,4	1,4
Hele vinduer		-*	0,7	0,7	1
Normalisert kuldebroverdi	W/m ²	0,03	0,03	0,03	0,06
Lekkasjetall	h-1	0,6	0,6	0,6	1

Tabell 4.3: Inndata, bygningskropp. *Se tabell 4.5 for inndata for de to ulike fasadeutformingene

4.4.2 Termisk masse

Det er nødvendig å anslå om bygget er termisk tungt eller lett med tanke på å vurdere effekten av nattekjøling. Normalisert varmekapasitet for modellen Klimasone er 572 kJ/m²K. Dette tilsvarer 159 Wh/m²K, som er nært tallet som tillegg B i *NS 3031* (2007) klassifiseres som 'Meget tung bygning' (164 Wh/m²K). Det antas at dette er representativt for bygget som helhet.

4.4.3 Fasade

For modell Klimasone er fasadeutforming tilnærmet lik slik den er prosjektert av arkitekt. I tillegg er det utformet en fasadeutforming som ligger nært makskravet i TEK10 for produktet av vinduers U-verdi og vindusandel av BRA.

For etasjemodellene R, PH og TEK er fasadeutforming er fritt utformet etter en glassandel prosjektert til 11%. Settpunktet for aktivering av solskjerming er gitt for innstrålt effekt på innsiden av glasset.

	Enhet	Klimasone	R	PH	TEK
Arealandel, vinduer, dører og glassfelt	%	0,15	0,11	0,11	0,11
Gj.snittlig karmfaktor	-	0,16	0,16	0,16	0,16
Solfaktor, vindu (g-verdi)	-	0,40	0,40	0,40	0,40
Total solfaktor, vindu og solavskjerming	-	0,06	0,06	0,06	0,06
Settpunkt, aktivering solskjerming*	W/m ²	50	50	50	50

Tabell 4.4: *Inndata, fasadeutforming. *Settpunktet til solavskjermingen settes for innstrålt effekt på innsiden av glassflaten.*

	Reell	Alternativ	Krav TEK10
γ , vindusandel av BRA	0,15	0,29	-
U_{vindu} [W/m ² K]	0,70	0,80	$\leq 1,60$
$\gamma \cdot U_{vindu}$	0,11	0,23	$< 0,24$

Tabell 4.5: *Nøkkeltall for reell og alternativ fasadeutforming som er brukt i modellen Klimasone.*

4.4.4 Internlaster

Internlaster for modellene klimasone og R er basert på reelle prosjekterte verdier. Modellen PH bruker internlaster gitt fra Dokka et al. (2009) i kategorien kontorbygg og modellen TEK bruker internlaster fra *NS 3031* (2007) i kategorien kontorbygg.

	Klimasone	R	PH	TEK
Lys	8	8	5	8
Utstyr	33,45	17,8	6	11
Personer	18	12,8	4	4

Tabell 4.6: *Internlaster [W/m²]. Verdiene for PH, og TEK er gjennomsnittlige verdier, mens for R vises installert effekt basert på prosjekterte verdier.*

	Nord	Øst	Sør	Vest	M.romskjerne	Støttearealer
Lys	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Utstyr	26,0	19,1	23,2	19,0	30,7	0
Personer	14,0	10,3	12,5	10,3	33,2	1,2

Tabell 4.7: Internlaster modell R, fordelt på soner [W/m^2].

4.4.5 Tekniske installasjoner

Tilluftstemperaturer (tabell 4.8) er valgt på grunnlag av prosjekterte verdier for ventilasjonskjøling. Minimums- og maksimumsluftmengder for romkjølingsalternativet er hentet fra *NS 3031* (2007). Minimumsluftmengde for ventilasjonskjøling velges fra *NS 3031* (2007) lik romkjølingsalternativet. Maksimumsluftmengde for ventilasjonsmengde er valgt etter prosjektert verdi ($25m^3/m^2h$) og satt noe høyere for at kjølekapasiteten er god nok. Utenfor drift er ventilasjonsmengden for alle løsninger i Klimasoner, R og PH satt etter Dokka et al. (2009) og for modellen TEK etter *NS 3031* (2007). Oversikt over ventilasjonsmengdene sees i tabell 4.9.

Settpunkter for oppvarming og kjøling er satt etter *NS 3031* (2007) og vises i tabell 4.12.

Tabell 4.13 viser verdier for andre komponenter. Til slutt vises driftstider for de ulike modellene i tabell 4.14.

Nattkjøling kan aktiveres etter visse kriterier mellom 1. april og 30. september i løpet av et år. Følgende kriterier for aktivering av nattkjøling er tatt fra prosjekterte verdier, og må alle oppfylles samtidig.

- Utetemperaturen er over $14^{\circ}C$;
- Utetemperaturen er minst $2^{\circ}C$ lavere enn temperaturen til avtrekksluften; og
- Avtrekksluften er over $21^{\circ}C$.

	Romkjøling	Vent.kjøling
Sommer	18	15,5
Vinter	19	17

Tabell 4.8: Tilluftstemperaturer [$^{\circ}C$]

	Klimasone	R	PH	TEK
I driftstid, romkjøling	7-10	7-10	7-10	7-10
I driftstid, vent.kjøling	7-28,8	7*-28,8	7-28,8	7-28,8
Utenfor driftstid	1	1*	1	2
Nattventilasjon	7	7	7	7

Tabell 4.9: *Luftmengder [m^3/m^2h]. *Se tabell 4.10 for variasjon av minimumsluftmengder*

	Minluft 7	Minluft 5	Minluft 4	Minluft var
I driftstid	7	5	4	4/0,7*
Utenfor driftstid	1	1	1	0,7

Tabell 4.10: *Ulike minimumsluftmengder studert for modell R.B [m^3/m^2h]. *0,7 gjelder for støttearealer og møteromskjerne, øvrige soner har 4 som minimumsmengde.*

	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
I driftstid	4	2,5	0,7
Utenfor driftstid	1	1	0,7

Tabell 4.11: *Ulike minimumsluftmengder studert for modell Møterom [m^3/m^2h].*

Oppvarming, drift	21
Oppvarming, utenfor drift	19
Kjøling	22/26

Tabell 4.12: *Settpunkter for kjøling og oppvarming [$^{\circ}C$]. NS 3031 (2007)*

	Enhet	Klimasone	R	PH	TEK
Temperaturvirkningsgrad, varmegjenvinner	%	85	85	85	80
Spesifikk pumpeeffekt, oppvarming	kW/(l/s)	0,5	0,5	0,5	0,5
Spesifikk pumpeeffekt, kjøling	kW/(l/s)	0,6	0,6	0,6	0,6
Spesifikk vifteeffekt (SFP)	kW/(m ³ /s)	1,5	1,5	1,5	2

Tabell 4.13: *Inndata, andre komponenter. Dokka et al. (2009); NS 3031 (2007); Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10) (2010).*

	Klimasone	R	PH	TEK
Ventilasjon	0600-2100	0600-2100	0700-1900	0700-1900
Natt-ventilasjon	2200-0600	2200-0600	2200-0600	2200-0600
Oppvarming	0700-1700	0700-1700	0700-1900	0700-1900
Lys	0700-1700	0700-1700	0700-1900	0700-1900
Utstyr	0700-1700	0700-1700	0700-1900	0700-1900
Personer	0700-1700	0700-1700	0700-1900	0700-1900

Tabell 4.14: *Driftstider, ventilasjon og internlaster. Alle driftstider gjelder mandag-fredag hele året, med unntak av nattventilasjon som også benyttes i helger.*

4.4.6 Beregningsmodell og samtidighet

I oppsettet av årssimuleringer settes samtidighetsverdier for internlastene. Det brukes 50% samtidighet for installert effekt i modell R. For modellene PH og TEK er de standardiserte internlastene gitt som årsgjennomsnittlige verdier og det brukes derfor 100% samtidighet.

	Klimasone	R	PH	TEK
Beregningsmodell	Climate	Energy	Energy	Energy
Samtidighet internlaster, %	-*	50	100	100

Tabell 4.15: *Beregningsmodell og samtidighet. *Årssimulering ikke gjennomført.*

Energibudsjettet settes opp ved å ta de aktuelle resultatene rett ut av beregningsmodellene, med unntak av energibehov for pumper, som beskrives nærmere i vedlegg B.

5 Resultater

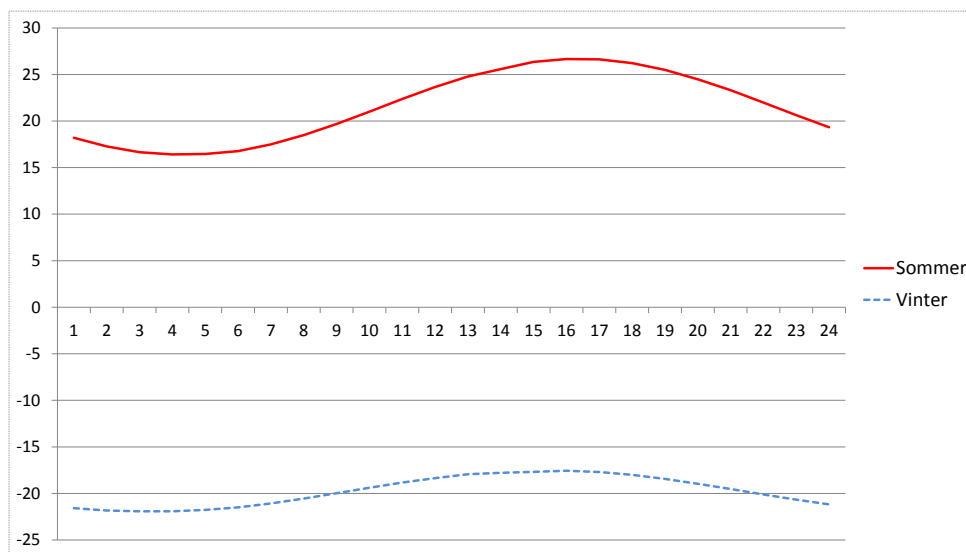
Det henvises til vedlegg A og figur A.1 og figur A.2 for simuleringshierarki og modellnavn. Resultatene presenteres og diskuteres fortløpende for en mer oversiktlig drøfting.

Først presenteres simuleringene av termisk komfort som er gjort i utsnitt av etasjens enkeltsoner. Dette gjøres hovedsakelig med analyse av temperaturforhold. Det er også studert forløp av tilluftsmengde og tilluftstemperatur for å undersøke hvordan ulike ventilasjonsaggregater ideelt vil oppføre seg i drift.

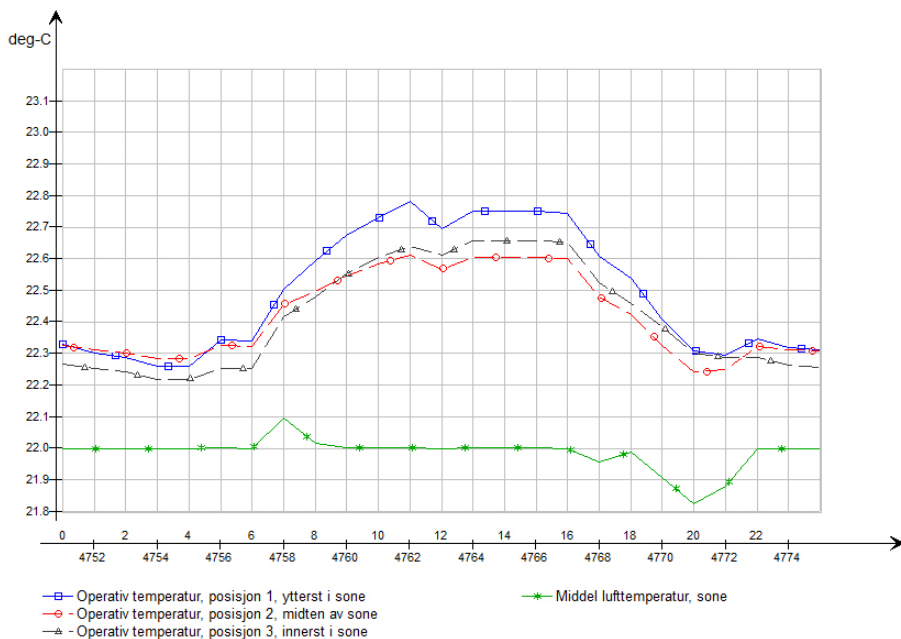
Deretter vises resultatene for energisimuleringene gjort i modellene som er utarbeidet for hele etasjen. Resultatene vist er alle grafiske versjoner av energibudsjettet vist i tabell 2.3. Det understrekes at resultatene som presenteres her er i *netto energibehov*.

5.1 Modell for variasjon innad i sone

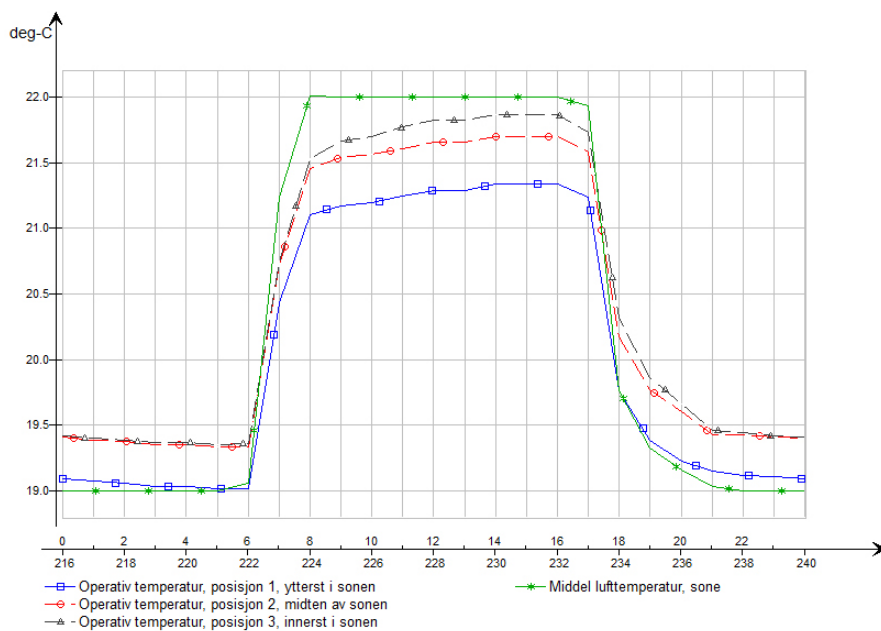
Under presenteres resultatene som er beskrevet i seksjon 4.1.2. Først vises utetemperaturforløpet som er brukt i simuleringen. Deretter er det tatt ut operativ temperatur for de ulike punktene i sonen som skal studeres.



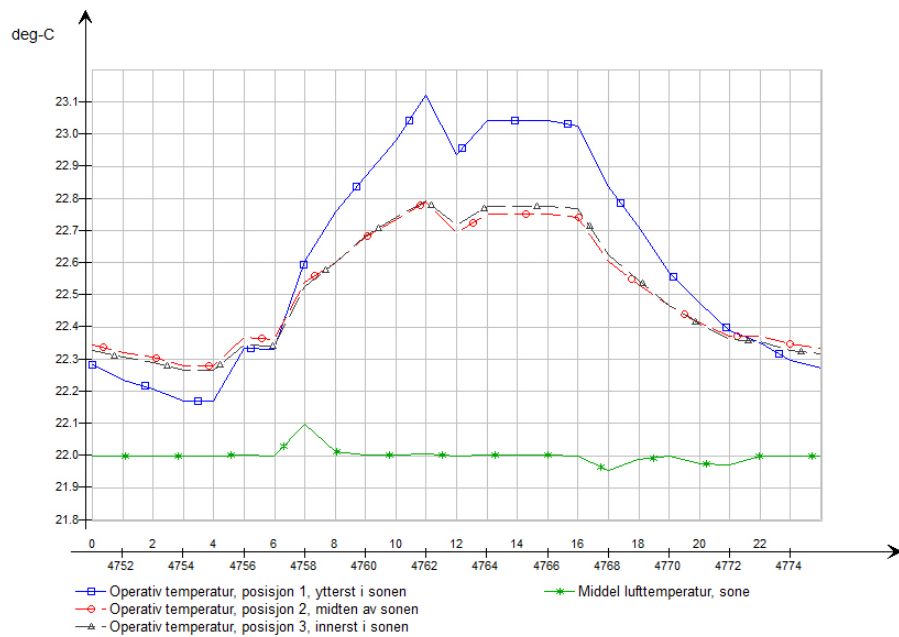
Figur 5.1: Utetemperaturer, vinter og sommer, brukt for simulering av temperaturvariasjon innad i sone.



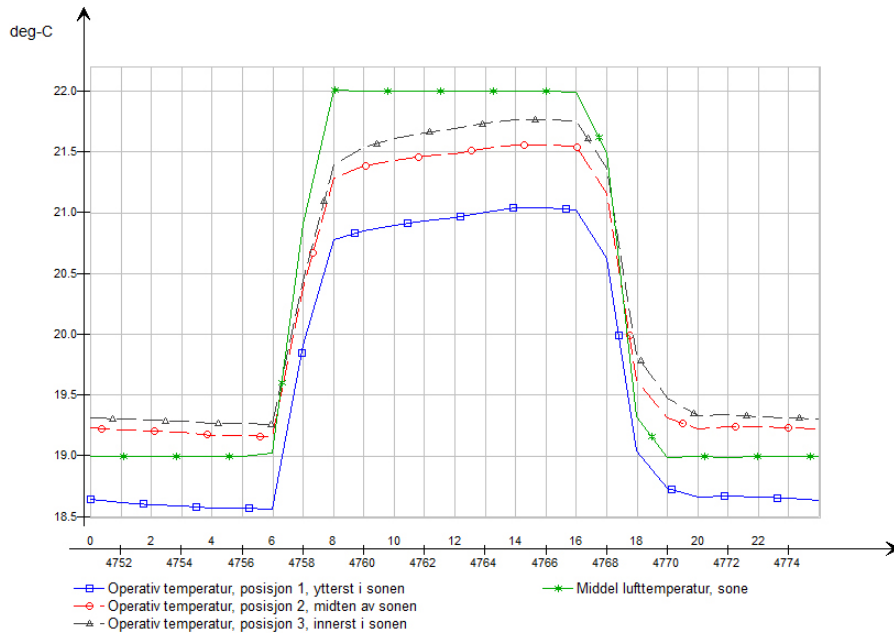
Figur 5.2: Operativ temperatur for 3 ulike posisjoner, syntetisk sommerklima, reell fasadeutforming.



Figur 5.3: Operativ temperatur for 3 ulike posisjoner, syntetisk vinterklima, reell fasadeutforming.



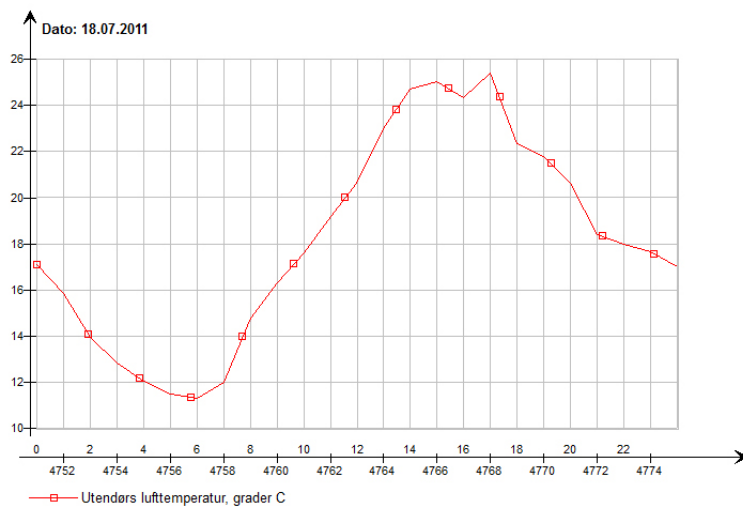
Figur 5.4: Operativ temperatur for 3 ulike posisjoner, syntetisk sommerklima, alternativ fasadeutforming.



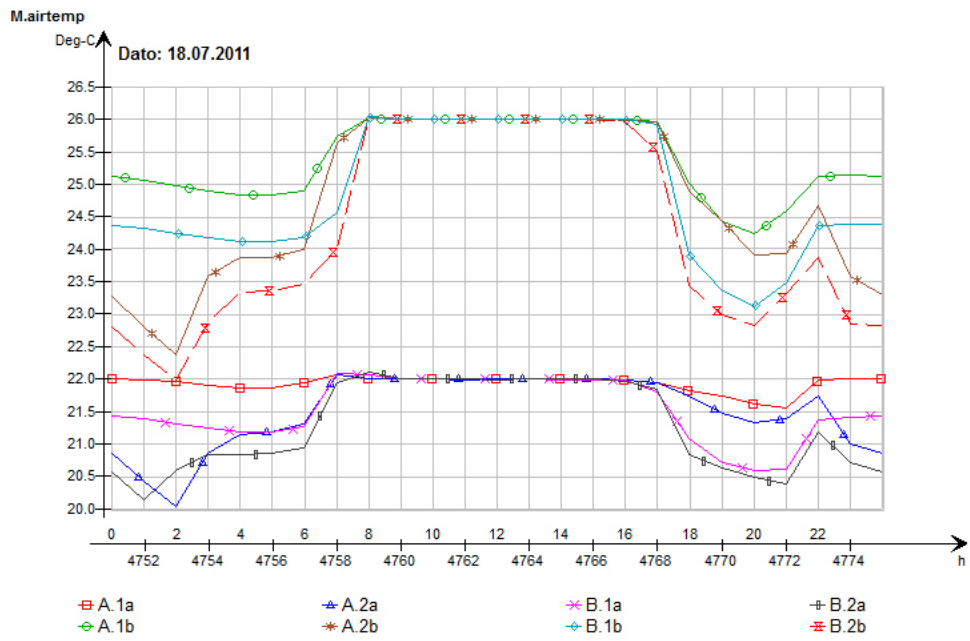
Figur 5.5: Operativ temperatur for 3 ulike posisjoner, syntetisk vinterklima, alternativ fasadeutforming

5.2 Modell for variasjon av systemløsninger og settpunkt

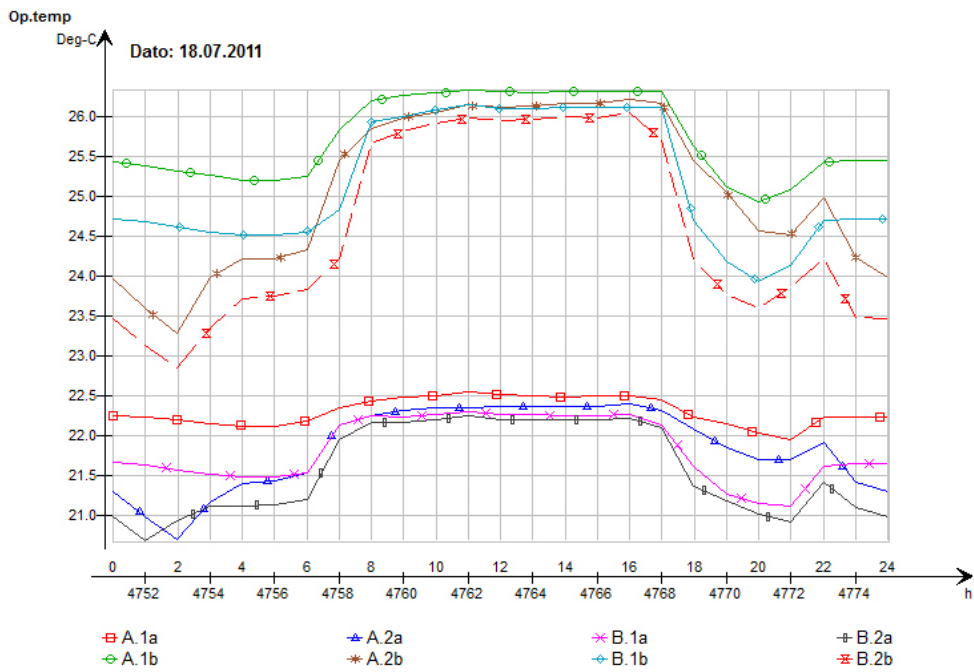
For modellene som er beskrevet i seksjon 4.1.3 er det tatt ut lufttemperaturer, operative temperaturer, tilluftstemperaturer og luftmengder for hver modell. Utendørs temperaturforløp som er brukt som grunnlag for simuleringene vises først i figur 5.6.



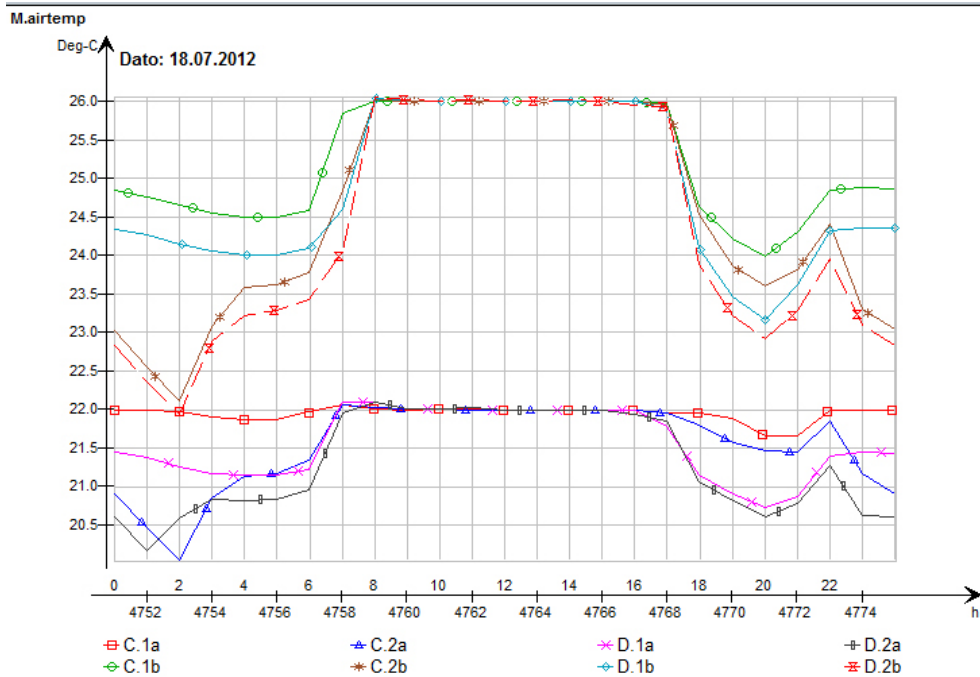
Figur 5.6: *Utendørs temperaturforløp, 18.07.2011*



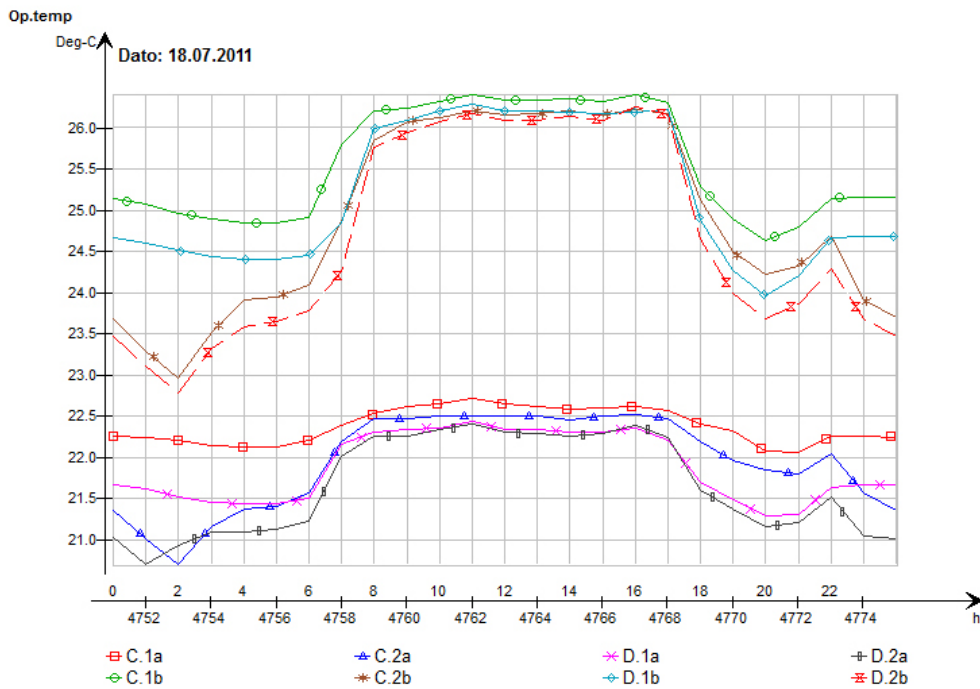
Figur 5.7: Lufttemperatur, solutsatt sone med reell fasadeutforming.



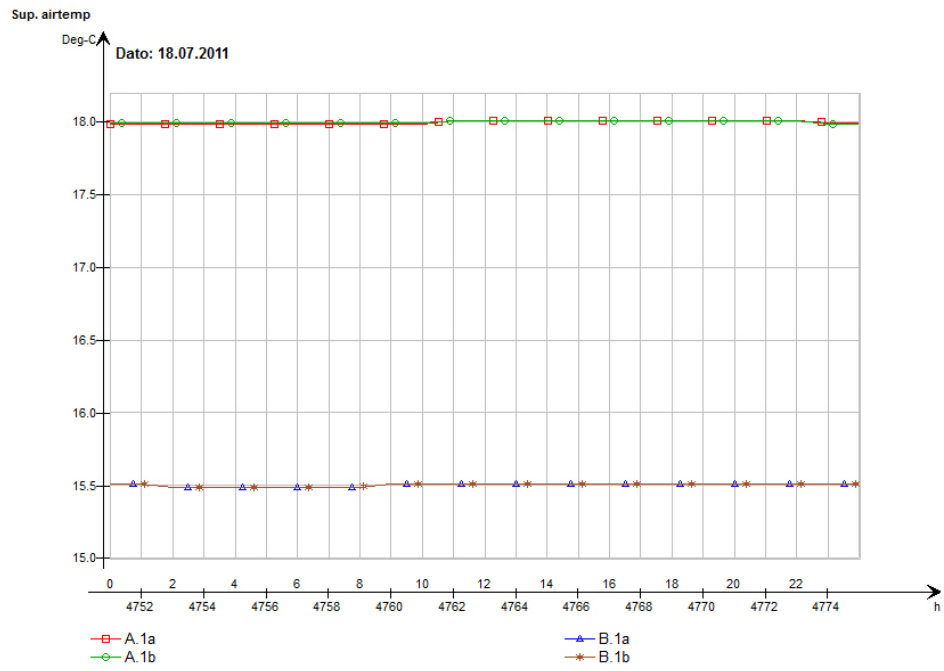
Figur 5.8: Operativ temperatur, solutsatt sone med reell fasadeutforming.



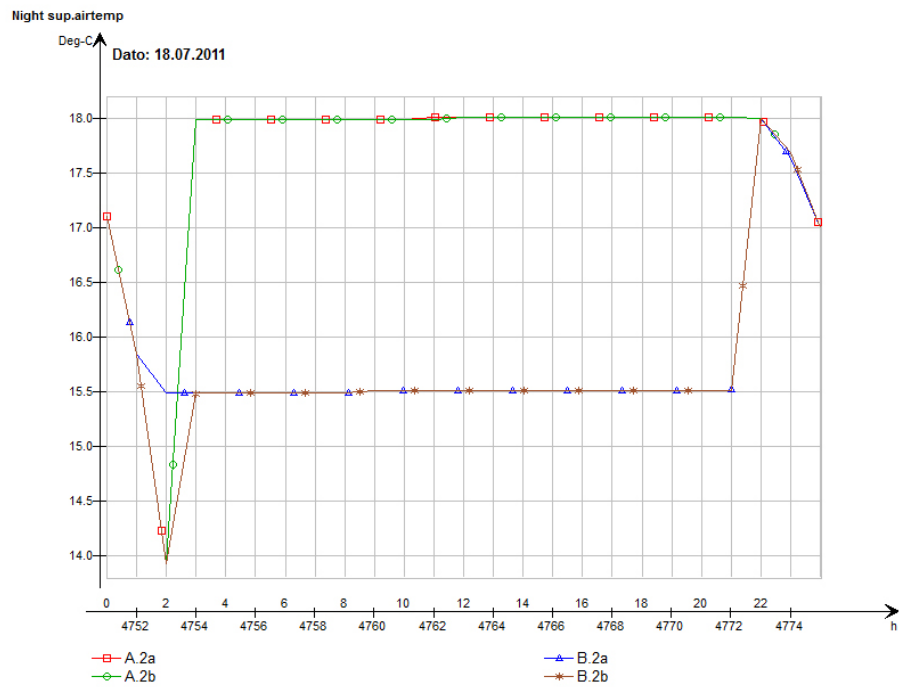
Figur 5.9: Lufttemperatur, solutsatt sone med alternativ fasadeutforming.



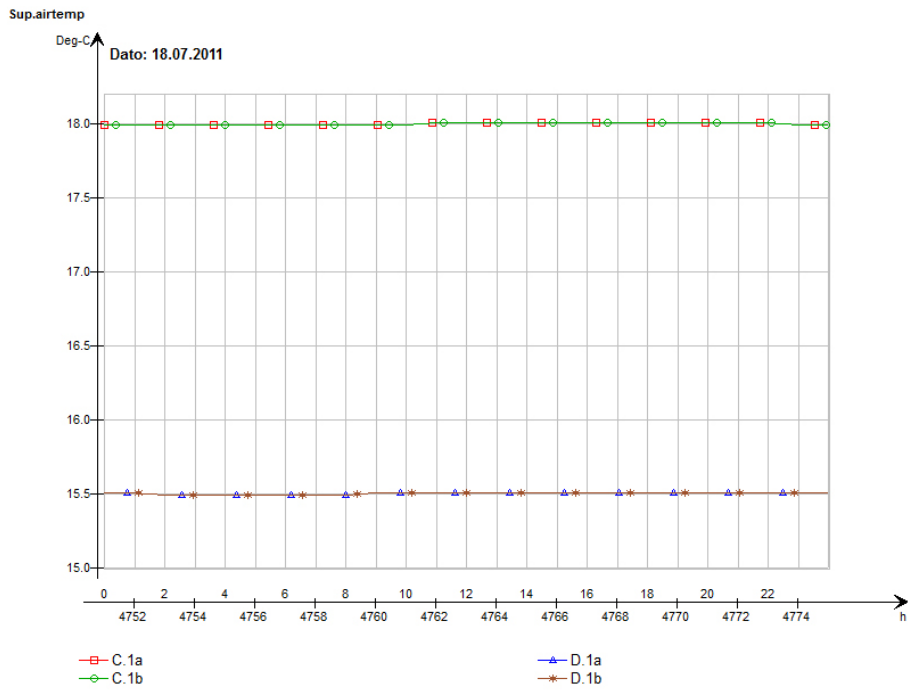
Figur 5.10: Operativ temperatur, solutsatt sone med alternativ fasadeutforming.



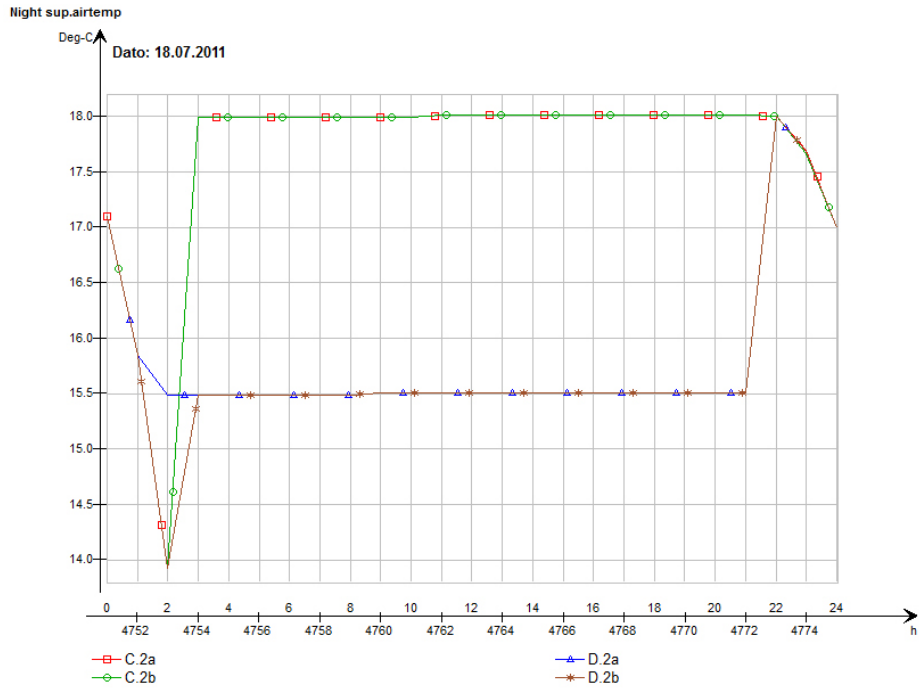
Figur 5.11: Tilluftstemperaturer



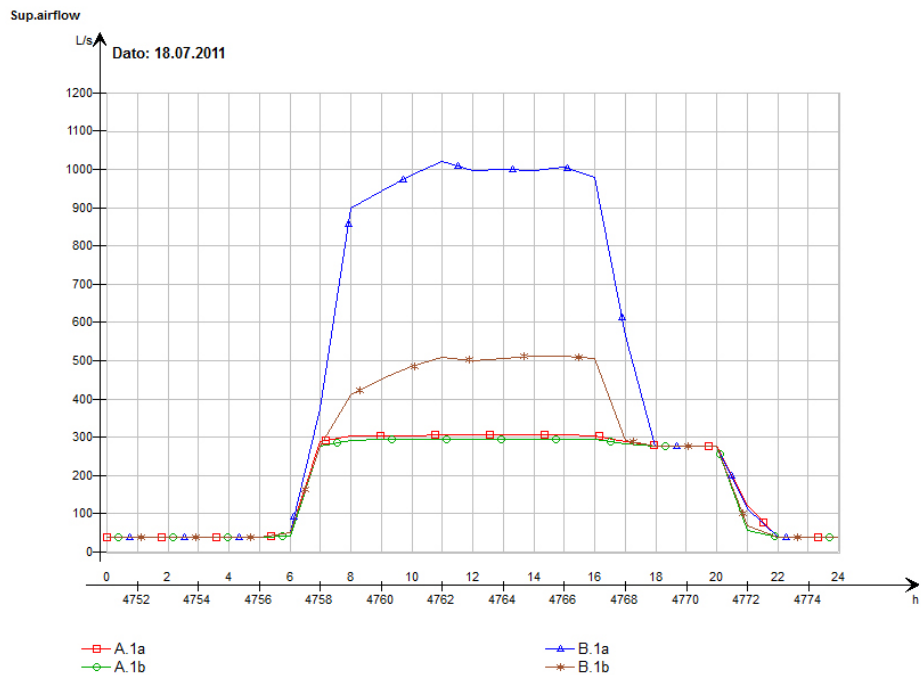
Figur 5.12: Tilluftstemperaturer



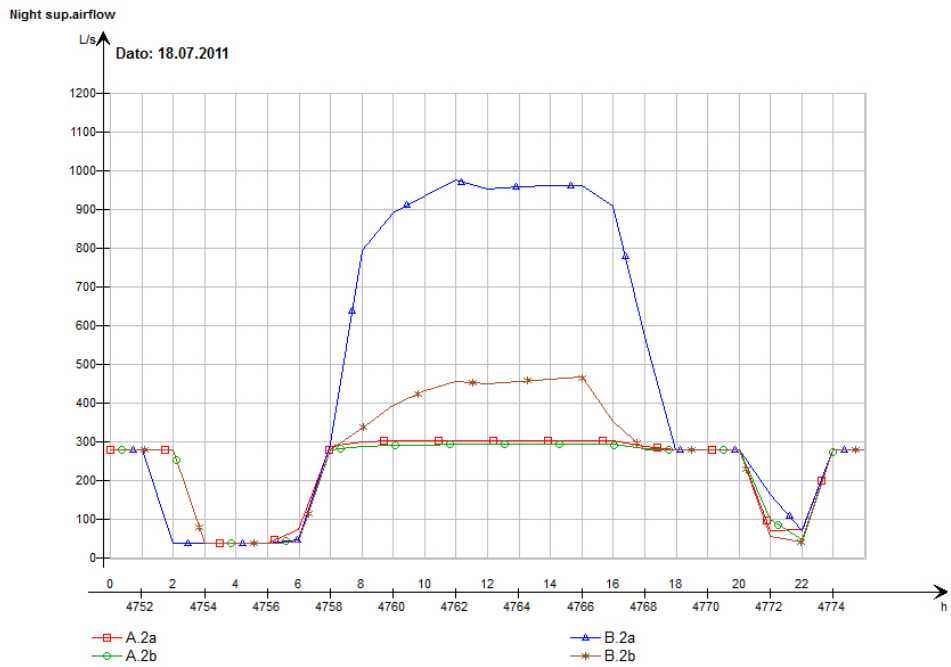
Figur 5.13: Tilluftstemperaturer



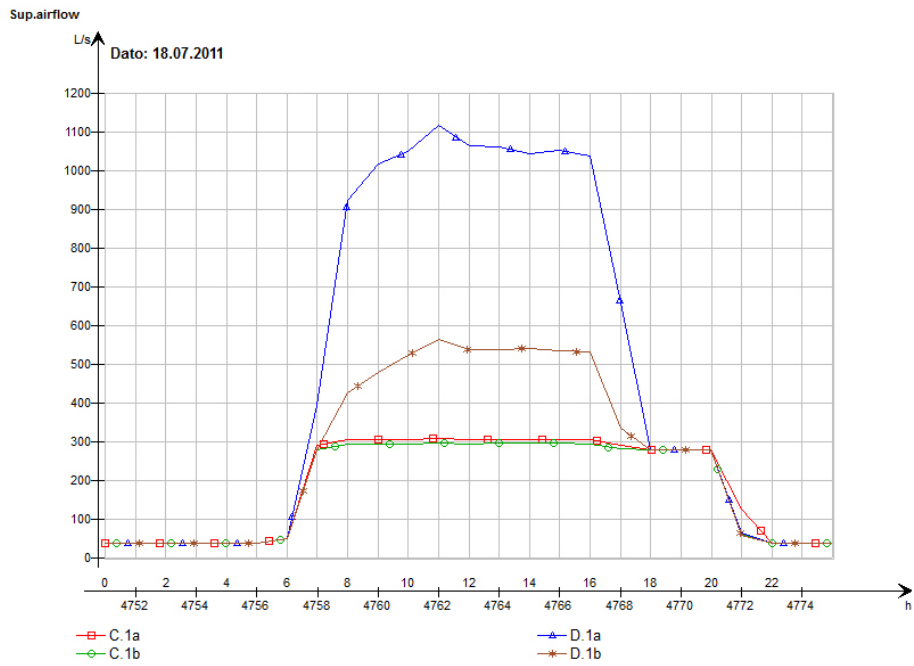
Figur 5.14: Tilluftstemperaturer



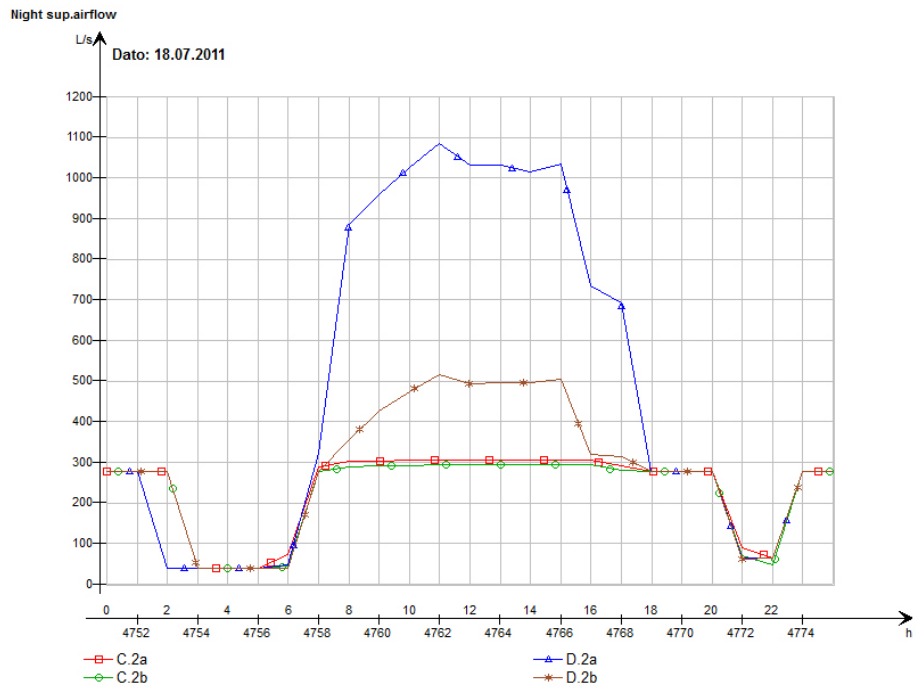
Figur 5.15: Luftmengder tilført, uten nattventilasjon, reell fasadeutforming



Figur 5.16: Luftmengder tilført, med nattventilasjon, reell fasadeutforming



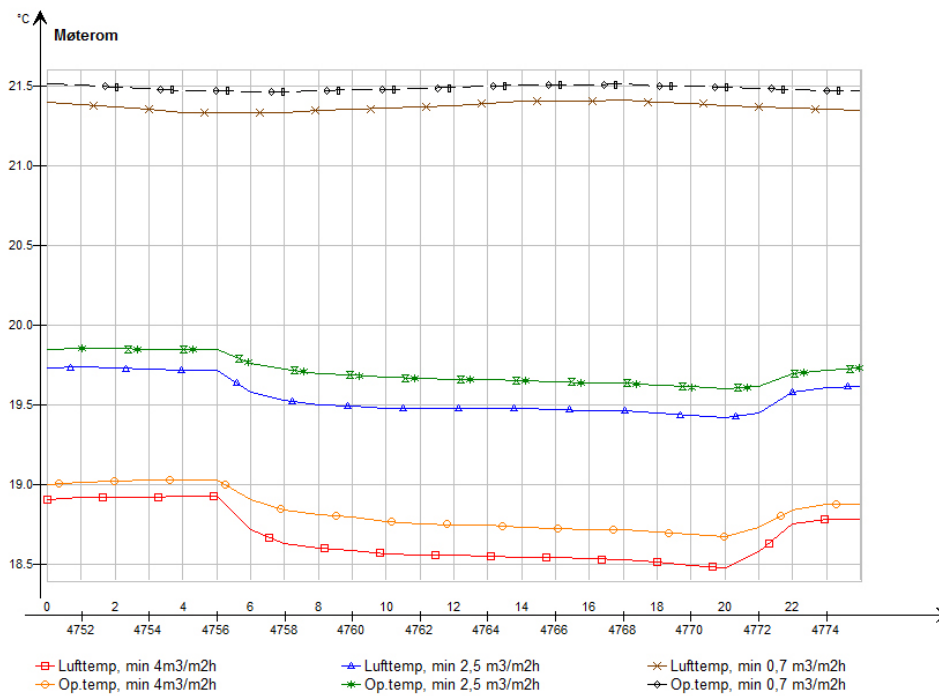
Figur 5.17: Luftmengder tilført, uten nattventilasjon, alternativ fasadeutforming



Figur 5.18: Luftmengder tilført, med nattventilasjon, alternativ fasadeutforming

5.3 Modell for studier av minimumsluftmengder i tomt møterom

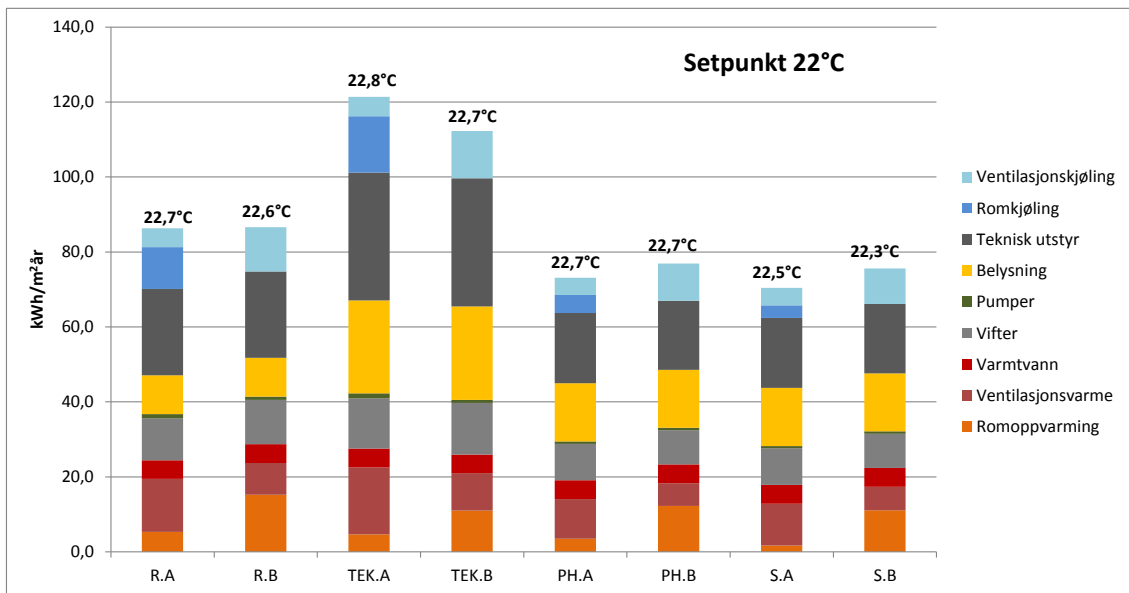
Her er det kun tatt med operativ temperatur og lufttemperatur for de tre ulike minimumsmengdene



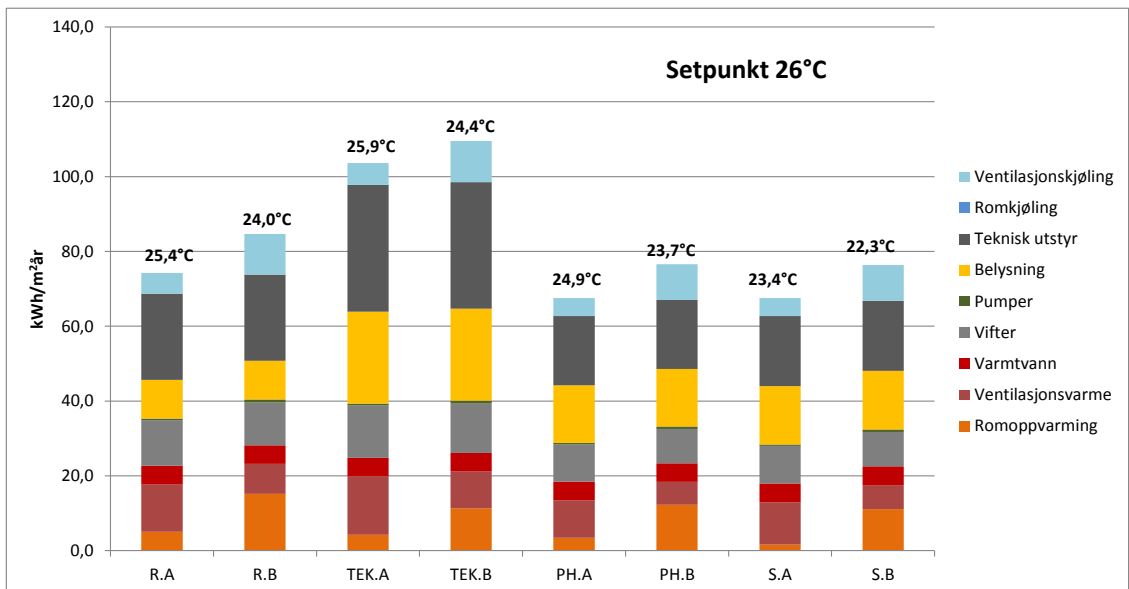
Figur 5.19: Lufttemperatur og operativ temperatur, tomt møterom ved ulike minimumsluftmengder.

5.4 Modell av hel etasje

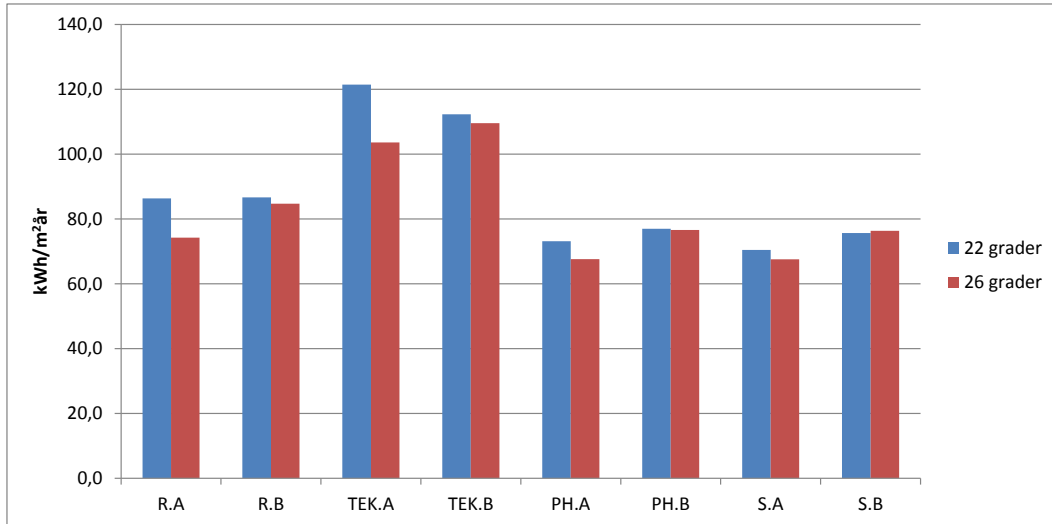
Her vises energibudsjettene som er tatt ut av modellene for hele etasjen som er beskrevet i seksjon 4.3. På toppen av hver søyle vises maksimal gjennomsnittlig operativ temperatur gjennom simuleringsforløpet.



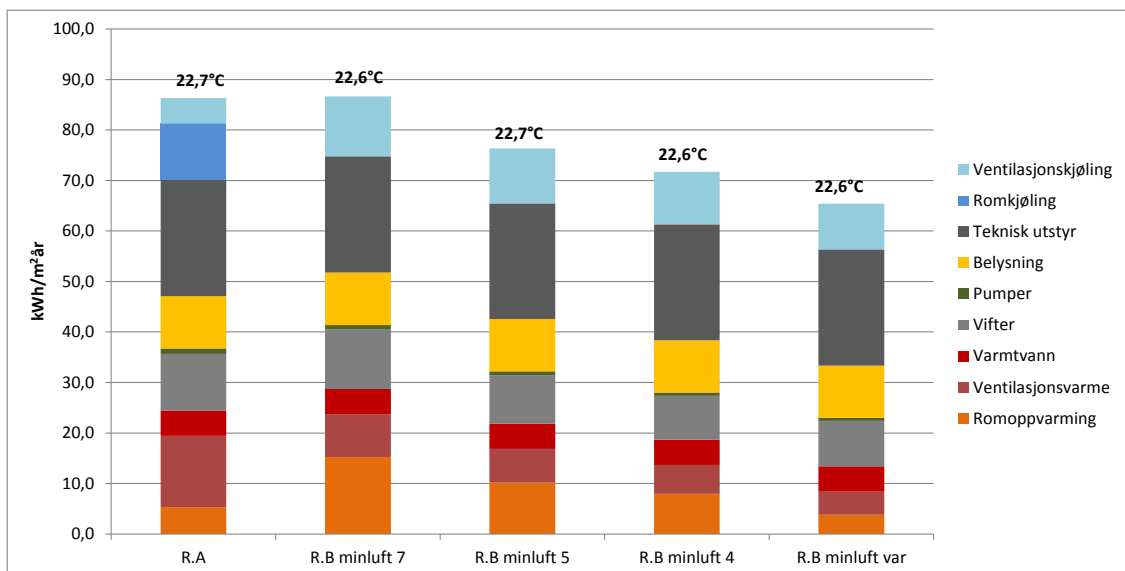
Figur 5.20: Spesifikt netto energibehov og maksimal gjennomsnittlig operativ temperatur ved settpunkt 22°C. Fordelt på kategorier etter energibudsjett



Figur 5.21: Spesifikt netto energibehov og maksimal gjennomsnittlig operativ temperatur ved settpunkt 26°C. Fordelt på kategorier etter energibudsjett



Figur 5.22: Oppsummert spesifikt netto energibehov for hele etasjen



Figur 5.23: Spesifikt netto energibehov for hele etasjen ved ulike minimumsluftmengder

6 Diskusjon

Det legges vekt på å ha et kritisk blikk på resultatene i diskusjonen av dem. Resultatene er hentet ut fra simuleringer og må vurderes med hensyn på parametere som vil påvirke de faktiske forhold som vil oppstå i virkeligheten, enten det gjelder termisk komfort eller energiytelse.

6.1 Termisk komfort

6.1.1 Variasjon av operativ temperatur innad i solutsatt sone

Figur 5.1 viser temperaturprofilene for utetemperaturen som er brukt under simulering av variasjon av temperatur innad i en sone. Figurene 5.2 og 5.4 viser hvordan operativ temperatur varierer innad i sonen ved dimensjonerende sommerforhold ved de ulike fasadeutformingene. Tilsvarende vises resultatene for de ulike posisjonene ved vinterforhold i figurene 5.3 og 5.5.

Figurene 5.2 og 5.4 viser at temperaturforholdene om sommeren generelt er høyere for scenariet med størst glassandel. Større glassarealer gir større andel varme overflater inne i sonen. Glassarealene gir fra seg mer langbølget stråling og resultatet er høyere operative temperaturer, opp mot $23,1^{\circ}\text{C}$ ytterst ved fasaden ved tidspunktet 11:00. Tilsvarende punkt i figur 5.2 ligger cirka $0,3^{\circ}\text{C}$ under dette, som viser at alternativet med reell fasadeutforming vil være bedre i forhold til å oppnå termisk komfort, fordi operative temperaturer her er nærmere 22°C . Generelt er også den totale forskjellen mellom maksimum og minimum operativ temperatur lavere for modellen med reell fasadeutforming enn for den alternative fasadeutforming, henholdsvis $0,2^{\circ}\text{C}$ og $0,3^{\circ}\text{C}$.

Et mulig avvik fra forventede forhold bør kommenteres. Ved sommerforhold vil forventningen være at det er varmest ytterst i sonen og kjøligst innerst. Figurene 5.2 og 5.4 viser derimot at den laveste operative temperaturen oppnådd i løpet av døgnet finnes i posisjon 2, altså i midten av sonen. Det ble forsøkt å finne flere årsaker til dette, uten å kunne vise til resultater som forklarte dette, men en mulig årsak kan være hvordan beregningen av operativ temperatur skjer i punktet innerst i sonen.

Resultatene for de ulike posisjonene ved vinterforhold i figurene 5.3 og 5.5 er mer som forventet. Operativ temperatur er lavest ytterst i sonen, der det er naturlig at overflatetemperaturene er lavest på grunn av kaldt klima utendørs. I det ytterste punktet er operativ temperatur lavere ved modellen for alternativ fasadeutforming enn modellen med reell fasadeutforming. Dette er også som forventet med tanke på modellenes glassandel. Som ved sommerforhold er også forskjellen mellom maksimum og minimum operativ temperatur størst ved modellen for alternativ fasadeutforming.

Oppsummert er det den reelle fasadeutformingen som gjør temperaturvariasjonene mindre. Solavskjermingen er også mest sannsynlig med på å redusere temperaturgradienten i sonen.

6.1.2 Innvirkning av systemløsninger og settpunkt på termisk komfort i solutsatt sone

Den solutsatte sonen er simulert for å undersøke ulike systemløsningers innvirkning på termisk komfort. Figur 5.6 viser temperaturforløpet over døgnet som simuleringen er foretatt. Det henvises til tabell 4.1 og figurene A.1 og A.2 i vedlegg A for oversikt over de ulike modellenes oppbygging.

Temperaturforhold

De første betraktninger som bør gjøres er å kontrollere at alle løsningene gir temperaturer slik settpunktet er satt. Settpunktet stilles for lufttemperatur, og resultatet for lufttemperaturene er vist i figurene 5.7 og 5.9. Alle løsninger ser ut til å holde settpunktet i god grad under driftstiden.

Figur 5.8 viser operative temperaturer for reell fasadeutforming. Disse gjelder for punktet midt i sonen. Løsningen som under disse sommerforholdene holder seg nærmest 22°C er modell B.2a, det vil si ventilasjonskjøling med nattventilasjon ved settpunkt 22°C. Rett over ligger tilsvarende løsning uten nattventilasjon, og dermed modellene med romkjøling, med løsningen uten nattkjøling som den modellen med høyest operativ temperatur.

En annet moment som kan registreres ved disse temperaturene er hvordan nattventilasjonsaggregatet påvirker temperaturforløpet gjennom døgnet. Det henvises igjen til tabell 4.1 for benevning av modellene. Lufttemperaturene for alle løsninger med samme settpunkt er like, og samtidig er det forskjell i operative temperaturer. Dette kan skyldes nattventilasjonens evne til å gi lavere overflatetemperaturer om dagen. Dette gir en lavere strålingstemperatur fra omgivelsene, og dermed lavere operativ temperatur. Siden bygget er klassifisert som en meget tung konstruksjon med tanke på termisk masse, skulle det også være sannsynlig at bygget har godt utbytte av nattventilasjonen når det gjelder å oppnå termisk komfort.

Ytterligere variasjoner i temperaturforløpene i sonen skyldes hvordan tilluftstemperaturer, luftmengder og internlaster varierer over døgnet. Tidlig på døgnet ligger løsningene med nattventilasjon (benevnet x.2x) lavest, henholdsvis for scenariet med settpunkt 22°C og scenariet med settpunkt 26°C. Av disse er det igjen scenariet med ventilasjonskjøling (B.2x) som ligger lavest, noe som sannsynligvis skyldes en lavere tilluftstemperatur om dagen.

Når det gjelder den alternative fasadeutformingen kan tendensene sies å være de samme når det gjelder hvilke løsninger som fungerer best i forhold til å oppnå

termisk komfort. Oppsummert kan rangeringen over systemene som er best egnet til å opprettholde termisk komfort i følge resultatene se slik ut:

1. Ventilasjon med nattventilasjon
2. Ventilasjon uten nattventilasjon
3. Romkjøling med nattventilasjon
4. Romkjøling uten nattventilasjon

Marginene er imidlertid små, og i virkeligheten kan forholdene variere mye. Det kan for eksempel i visse tilfeller tillates noe høyere temperaturer i deler av året, som vil redusere behovet for luftmengder og dermed energibehov. For denne rapporten er det imidlertid viktig å være konsistent mellom valgte tekniske løsninger, termisk komfort og energibehov. For at resultatene skal være sammenliknbare med tanke på energibehovsberegninger, må det stilles det samme kravet til termisk komfort for hver av løsningene som skal vurderes.

Systemforløp

Det er foretatt en kontroll og analyse av ventilasjonsanleggets tilluftstemperaturer og tilførte luftmengder. Med en analyse av forløpet til disse parametrene kan enkelte kvalitative forhold ved systemenes energiytelse beskrives.

Tilluftstemperaturene er vist i figurene 5.11 og 5.12 for reell fasadeutforming og figurene 5.13 og 5.14 for alternativ fasadeutforming. Ikke overraskende er disse like avhengig av om det brukes nattventilasjon eller ikke, siden samme verdier er brukt som inndata til ventilasjon for de to fasadeløsningene.

Løsningene uten nattventilasjon holder de tilluftstemperaturene de er satt til gjennom hele døgnet.

Løsningene med nattkjøling starter døgnet i nattkjølingsmodus. I det tillufta når 14°C skrus aggregatet av og tilluftstemperaturen stiger til de respektive aggregatens settpunkter. Dette er fordi kriteriet om at uteluften holder mer enn 14°C ikke lenger er tilstede. Unntaket er løsningen B.2a og D.2a, som begge avbryter nattkjølingen cirka en time før de andre løsningene gjør det. Dette kan være fordi en av kriteriene for aktivering av nattkjøling ikke lenger er tilstede.

Nattkjølingen er altså aktivert i 3-4 timer i løpet av døgnet, og i dette tidsrommet benytter bygget seg av frikjøling med kun energibehov til viftedrift. I det samme tidsrommet er det for løsningene uten nattkjøling et energibehov for å varme eller kjøle lufta til ønsket tilluftstemperatur. Slikt sett vil nattkjøling tilby større energieffektivitet for bygget gjennom nattkjølingssesongen.

Figurene 5.15 og 5.16 viser tilførte luftmengder for modellen med reell fasadeutforming, og figurene 5.17 og 5.18 for modellen med alternativ fasadeutforming.

Generelt om alle modellene er luftmengdene høyest for modellene med ventilasjonskjøling ved settpunkt 22°C , med luftmengder i området 1000-1100 l/s. Under ligger ventilasjonskjøling med settpunkt 26°C , som bare krever cirka halvparten av luftmengdene for å opprettholde settpunkt.

Så ligger modellene med lokalkjøling på cirka 300 l/s, som så vidt er over minimumsmengden i driftstiden. Luftmengdene virker her uavhengig av settpunkt, og det er fordi det er romkjølingen som står for å holde settpunktstemperaturen i sonen. Ventilasjonsmengden reguleres i dette tilfelle etter CO_2 framfor temperatur.

Tilsvarende om luftmengdene ved nattventilasjon som ved tilluftstemperaturene kan det observeres når nattventilasjonen er aktivert. Dette kan også sees i sammenheng med temperaturforholdene i sonen. For eksempel, der nattventilasjonen avsluttes for B.2a, figur 5.16, kan det i korresponderende figur 5.8 for operativ temperatur på samme tidspunkt sees at temperaturen stiger over A.2a. Det er fordi A.2a fortsatt har aktivert nattkjøling og sonen kjøles noe mer ned enn B.2a. Deretter, når tilluftstemperaturen til A.2a stiger opp til 18°C , som vist i figur 5.12 ved tidspunktet 03:00 stiger også temperaturen i rommet over B.2a, som nå holder en lavere tilluftstemperatur.

Med tanke på ventilasjonskjøling og luftmengder, krever løsningen med den reelle fasadeutformingen generelt lavere luftmengder for å holde ønsket temperatur. Den maksimale forskjellen ligger ved omlag 100 l/s. Ved en omtrentlig beregning med formel 3.1 finner man at dette tilsvarer en kjølekapasitet på cirka. 1000 W dersom en antar en lufttemperatur i avtrekket på 24°C . Forskjellen mellom modellene med og uten nattkjøling med reell fasadeutforming ligger i underkant av 50 l/s, tilsvarende cirka 500 W kjølekapasitet.

I varme perioder er det altså potensiale for redusert energibehov ved valg av nattkjøling kombinert med ventilasjonskjøling.

6.1.3 Ulike minimumsmengders innvirkning på temperaturforhold i tomme møterom og støttearealer

Figur 5.19 viser temperaturene som er simulert for ulike minimumsmengder ved et tomt møterom. Dette er ved ventilasjonskjøling, og tilluftstemperaturen er $15,5^{\circ}\text{C}$. Den største minimumsmengden virker naturlig nok å være den som fører til lavest temperaturer i sonen. Temperaturene som oppstår i driftstiden er under 19°C , en temperatur som kan oppleves som noe kjølig hvis det skulle bli tatt i bruk.

Under faktiske forhold vil selvfølgelig nærliggende møterom kunne bli brukt mens andre står tomme, og det vil kunne skje en varmeutveksling mellom møterommene i kjernen. Det samme gjelder dersom det befinner seg møterom over eller under det aktuelle rommet.

Figur 5.19 viser likevel at man skal være forsiktig med bruk av for høye minimumsluftmengder når det brukes et ventilasjonskjølesystem. Lave temperaturer

kan like gjerne oppstå i et toalettområde eller i andre støttearealer der internlastene er relativt lave i driftstiden.

Reduksjon av byggets energibehov vil kunne reduseres ved bruk av lavere minimumsluftmengder. Ved økt bruk av lav-emitterende materialer og fleksible til-luftskomponenter vil dette kunne oppnås.

6.2 Modell for hel etasje

Figurene 5.20 og 5.21 viser en grafisk oppsetning av energibudsjettene for spesifikt netto energibehov til de ulike modellene av hele etasjen. Netto energibehov presenteres med maksimal gjennomsnittlig operativ temperatur vist over hver søyle i diagrammene for et gitt scenarie. Det legges ikke her vekt på å studere energibehovene som verdi i seg selv, men i forhold til hverandre som et sammenlikningsgrunnlag for de ulike systemløsningene.

6.2.1 Settpunkt 22°C

Det første som kanskje legges merke til ved figur 5.20 er at for det reelle alternativet er energibehovet ved romkjøling og ventilasjonskjøling nokså likt. Ved TEK-løsningene er energibehovet generelt høyere, men bruk av ventilasjonskjøling gjør reduserer energibehovet noe. Passivhusløsningene krever derimot mer energi ved bruk av ventilasjonskjøling. Forventningene tilsier at ventilasjonskjøling skal mindre totalt netto energibehov. Det kan være flere årsaker til problemet.

Med ventilasjonskjøling benyttes det i sommersesongen store luftmengder for å oppnå settpunktstemperaturen, og dette kan være en av grunnene til det høye energibehovet. I virkeligheten kan det hende at den operative temperaturen tillates litt høyere, og luftmengdene vil reduseres.

Likevel kan det være parametrene som er brukt over vintersesongen som skyldes den lille forskjellen mellom løsningene for romkjøling og ventilasjonskjøling i scenarie R. Tilluftstemperaturen ved ventilasjonskjøling er 17°C om vinteren, og minimumsluftmengden er satt til 7 m³/m²h. I og med at romoppvarmingsbehovet er relativt stort, opp mot 20 kWh/m²år, kan dette tyde på at ventilasjonskjølingen og romoppvarmingen jobber mot hverandre for å holde ønsket temperatur i sonene.

Dette kan også være tilfellet for passivhusscenariene, der alternativ B krever mer energi enn alternativ A.

I modellen TEK slår ventilasjonskjøling mer som forventet ut på energibehovet. I scenariet TEK brukes en mindre tett bygningskropp og noe høyere U-verdier. Internlastene er også betydelig høyere og står for mye varmetilskudd i sonene. Generelt kan det observeres noe et noe høyere energibehov for vifter og ventilasjonsvarme, noe som kan skyldes bygningens noe høyere lekkasjetall enn ved de andre modellene.

Generelt om temperaturene i figur 5.20 kan det sies at de holder nær tilfredstillende verdier. Det understrekes at de maksimale operative temperaturene som er vist med diagrammet er gjennomsnittlige verdier for en sone, og tar ikke hensyn til plassering i rommet. Temperaturen kan altså i virkeligheten variere innad i en sone, slik det er beskrevet i seksjon 6.1.1.

6.2.2 Settpunkt 26°C

Figur 5.21 viser stort sett temperaturer under settpunktet. Settpunktet stilles for lufttemperaturen, og en lavere operativ temperatur vil da tilsi at det er kjøligere flater i sonen som reduserer operativ temperatur. I denne figuren kan det også sees at energibehovet for romkjøling er fraværende. Løsningene med romkjøling ser ut til å holde settpunktet kun ved tilførsel av ventilasjonsluft. Det samme problemet ved ventilasjonskjøling som ved settpunkt 22°C ser ut til å gå igjen her. Her er antakeligvis også minimumsluftmengdene ved bruk av ventilasjonskjøling problemet.

6.2.3 Innvirkning av minimumsluftmengde for ventilasjonskjøling på spesifikt netto energibehov

Ser man på oppsummeringen av totalt netto energibehov sortert på settpunkt i figur 5.22 kan det virke som energibehovet ved bruk av ventilasjonskjøling i alle scenariene er tilnærmet uavhengig av om settpunktet er satt til 22 eller 26°C. Ved bruk av romkjøling observeres generelt lavere energibehov ved settpunkt 26°C. Dette kan man forvente fordi kjølebehovet reduseres. Man burde kunne forvente det samme for ventilasjonskjøling, men resultatene for ventilasjonskjøling er ikke som forventet.

Det er blitt nevnt at problemet kan skyldes for at en for høy minimumsluftmengde om vinteren forårsaker unødvendig kjøling av bygget slik at det må kompenseres med oppvarming. En eventuell løsning på et slikt problem kan være å redusere minimumsluftmengden for løsningen med ventilasjonskjøling. Figur 5.23 viser tydelig at reduksjon av minimum luftmengde reduserer totalt netto energibehov for hele etasjen.

Det observeres også at oppvarmingsbehovet reduseres betraktelig.

6.2.4 Innvirkning av soneinndeling og solavskjerming på beregning av energibehov

Figurene 5.20, 5.21 og 5.22 viser liten forskjell mellom energibehov for modellene PH og S, der PH er flersonemodellen og S er ensonemodellen. Soneinndeling skal i prinsippet ta høyde for at ulikt soltilskudd forekommer på forskjellige tidspunkt i ulike soner i bygget, og man ville i utgangspunktet forventet mindre energibehov ved ensonemodellen. Da det i denne modellen er installert høyeffektiv solavskjerming, kan en årsak til at det ikke er så stor forskjell skyldes nettopp solavskjermingen. Soltilskuddet reduseres betraktelig, og behovet for soneinndeling er ikke like relevant.

Solavskjermingen aktiveres imidlertid ved 50 W/m² innstrålt soleffekt på innsiden av vindu. Dette kan være litt for lite, og kan føre til at solavskjermingen

aktiveres selv ved kun diffus stråling. I virkeligheten vil en også ta hensyn til dagslysforhold, og utforming av fasader vil kombinere vinduer med solavskjerming og andre vinduer som er ment å slippe gjennom dagslys.

Hadde settpunktet for solavskjerming vært noe høyere, ville det vært en mulighet at energibehovet hadde blitt beregnet annerledes.

7 Konklusjon

Resultatene som er diskutert tilsier at ventilasjonskjøling er funnet til å være det beste alternativet med tanke på byggets energiytelse. Det er også kapabelt til å gi tilstrekkelig termisk komfort i en sone, men dette avhenger av mange faktorer, som for eksempel luftmengder og tilluftstemperaturer. Dersom det installeres komponenter som lar seg variere i stor grad med tanke på disse faktorene, vil det skape en god løsning som oppnår lavt energibehov samtidig som det ivaretar et godt termisk inneklima. I virkeligheten vil det være ytterligere rom for at tilluftstemperaturen har forskjellige verdier

I tillegg vil nattkjøling også egne seg som en installasjon som kan redusere energibehov samtidig som det i varme perioder vil virke positivt for byggets inneklima. Utnyttelsen av nattkjøling er avhengig av byggets termiske masse, noe som ikke er studert inngående her, men ut i fra resultatene om termisk komfort ser det ut til å ha en god effekt på det aktuelle byggets inneklima. Nattkjøling er også en realistisk løsning som kan la seg utnytte i reelle bygg.

Av passive tiltak er to ulike fasadeutforminger studert og det viser at det med tanke på termisk komfort er den reelle fasadeutformingen som gjorde seg best. I tilfelle for ventilasjonskjøling krevdes det en økning på cirka 10% i luftmengder for å holde kravet for termisk komfort ved bruk av den alternative fasadeutformingen.

Fasadeutforminger vil imidlertid i realiteten være en kombinasjon av vinduer med og uten solavskjerming, på grunn av ønsket om å utnytte dagslys. Utbyttet er mindre installert effekt til belysning.

Kjernen av bygget som er modellert er brukt til møterom og støttearealer. Dette er områder som kan stå lenge uten internlaster og er sensitive for høye minimumsluftmengder. Det ble vist at ved et modellert møterom antatt adiabatisk bortsett fra en vegg ut til gang med sentralavtrekk, var en tilførsel av $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ nok til å kjøle rommet ned til en lufttemperatur på cirka $18,5^\circ\text{C}$. Tilført minstemengden fra TEK10, $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, holdt rommet ved omtrentlig $21,5^\circ\text{C}$. Lavere luftmengder er også gunstig for energiforbruk, og bør tillates der rommet ikke er i bruk. Reglene i TEK10 er imidlertid litt uklare på dette, og gir rom for tolkning av når bygget eller rommet ikke er i bruk. Her kunne det hjulpet med en presisering.

Energisimuleringene viste først i liten grad den forskjellen som var forventet mellom bruk av romkjøling eller ventilasjonskjøling. Dette skyldtes antakeligvis for høye minimumsluftmengder ved bruk av ventilasjonskjøling. Det ble dermed funnet at ved å redusere minimumsluftmengdene for ventilasjonskjøling ble energibehovet redusert. Luftmengder ned til $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ i kjernen av bygget og $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ i kontorlandskapet gav det laveste energiforbruket.

Bruk av ulike inndata påvirker resultatene. Et noe uklokt valg av en minimumsluftmengde på $7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ førte til uventede og forstyrrende resultater. Et godt eksempel på at resultatene du får ikke er bedre enn inndataen man bruker.

Der standardene ikke setter spesifikke krav til for eksempel ventilasjonskjøling, kan misforståelser oppstå og dårlige resultater fås ut. Dette blir fort til avvik mellom beregnet og levert energi.

En liten forskjell mellom de to ulike soneinndelingene av etasjen gav inntrykk av solavskjerming gjør soneinndeling mindre nødvendig. Det understrekes imidlertid at settpunkt for solavskjerming er satt til 50 W/m^2 innstrålt effekt på innsiden av glasset, noe som kan være litt lavt. Ved høyere settpunkter vil mer solinnstråling slippe inn og modellen kan igjen bli sensitiv for ulike soneinndelinger. Det er viktig å være bevisst på dette.

Oppsummert skiller ventilasjonskjøling med nattventilasjon seg ut som en god løsning. Dersom faktiske forhold tillater det, anbefales det og å senke minimumsluftmengdene til områder som står lite i bruk og med få internlaster. Dette kan unngå å måtte varme opp sonen dersom unødvendig mye friskluft med lav temperatur blir tilført.

8 Videreføring av arbeidet

Resultatene som er presentert i denne rapporten er i alt hentet ut av 44 forskjellige simuleringer. Det har gått mye tid til modellene i seg selv. En omprioritering av simuleringsfokuset til færre modeller og flere resultater kunne ført til mer dybde i analysene. Mange av rapportens resultater kan imidlertid gi en pekepinn til videre studier.

- *Solavskjerming*: En studie av solavskjermingens innvirkning på energibehov er relevant med tanke på å studere ulike fasadeutførelser. Sammenhengen mellom soneinndeling av en simuleringsmodell og bruk av solavskjerming kan også være en interessant problemstilling.
- *Ventilasjonskjøling*: Flere studier kan gjøres med tanke på effektiv utnyttelse av ventilasjonskjøling. Parametere som kan studeres er tilluftstemperatur, forskjellige luftmengder eller ulike komponenter for tilførsel av luft.
- *Økonomiske betraktninger*: I hvilken grad skiller de forskjellige systemene seg ut økonomisk? Hvordan spiller levetidskostnader inn på valg av system?

Referanser

- Arbeidstilsynet (2006), Veiledning om klima og luftkvalitet på arbeidsplassen, Veiledning, Arbeidstilsynet.
- Dokka, T. H., Klinski, M., Haase, M. & Mysen, M. (2009), Kriterier for passivhus- og lavenergibygg - yrkesbygg, Prosjektrapport 42, SINTEF.
- EQUA Simulation AB* (2010), Validation of IDA Indoor Climate and Energy 4.0 with respect to CEN Standards EN 15255-2007 and EN 15265-2007. Valideringsdokument.
- Fang, L., Clausen, G. & Fanger, P. O. (1998), 'Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality', *Indoor Air* **8**(2), 80–90.
- Fanger, P. O. (1970), *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*, McGraw-Hill.
- Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10)* (2010).
URL: <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20100326-0489.html>
- Høseggen, R. Z. (2008), Dynamic use of the building structure - energy performance and thermal environment, doktoravhandling, NTNU.
- Langseth, B., Everett, E. N. & Havskjold, M. (2011), Energibruk i lavenergi- og passivbygg - en sammenligning av forventet og målt energibruk, Rapport utarbeidet for energi norge, XRGIA.
- Nilsson, P. E., ed. (2003), *Achieving the Desired Indoor Climate - Energy Efficiency Aspects of System Design*, Studentlitteratur, The Commtech Group.
- Novakovic, V., Hanssen, S. O., Thue, J. V., Wangensteen, I. & Gjerstad, F. O., eds (2007), *ENØK i bygninger - Effektiv energibruk*, Gyldendal Norsk Forlag AS.
- NS 3031* (2007), Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data. Standard Norge.
- NS-EN 15251* (2007), Inneklimaparametre for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk. Standard Norge.
- NS-EN ISO 7730* (2006), Ergonomi i termisk miljø, Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort. Standard Norge.

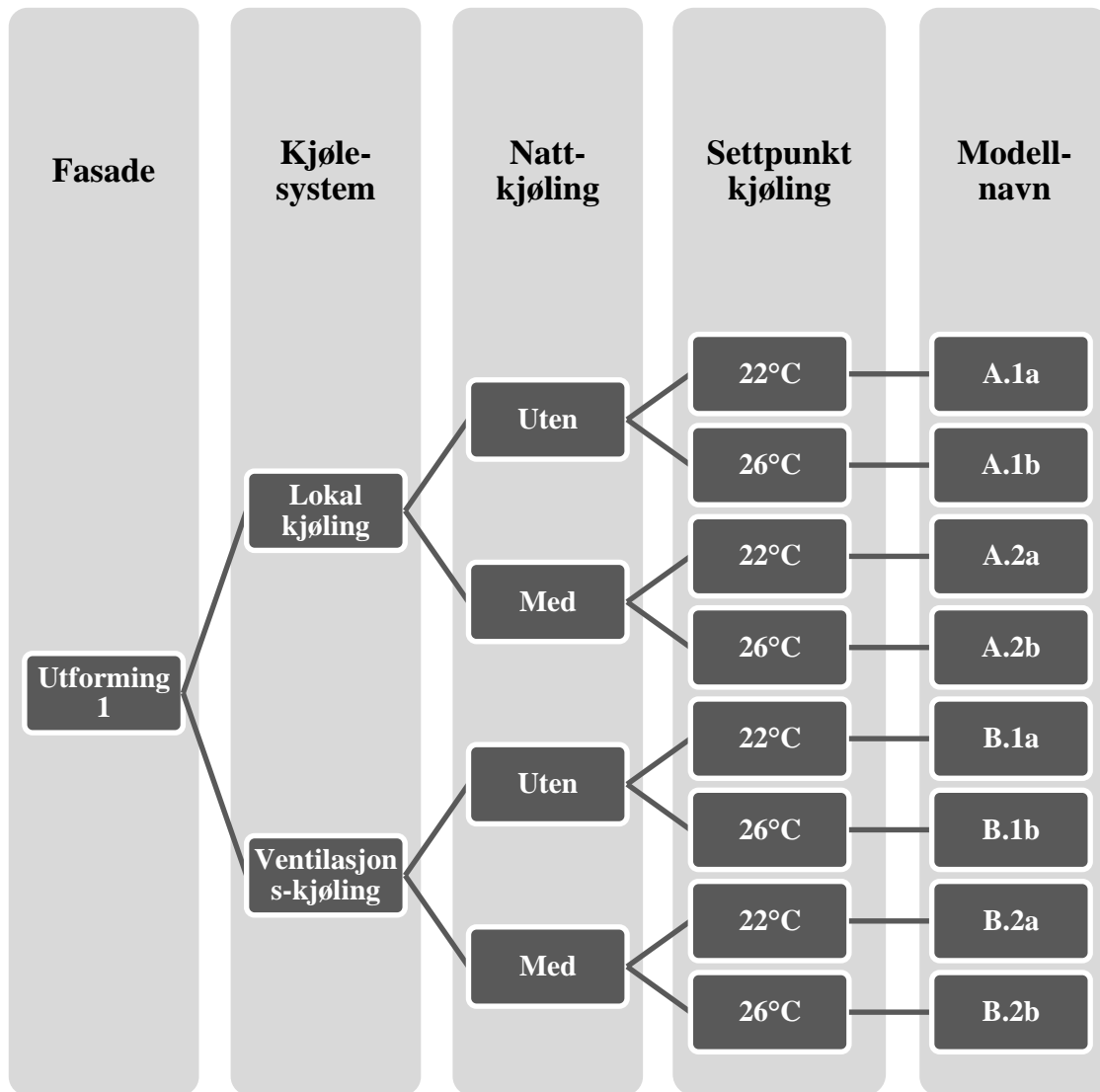
Nydalen Arkitektkontor AS (2011), Fasadetegninger og vindusskjema, sist revidert 28.10.2011.

Seppänen, O. (2008), *Air*, Swegon Air Academy, Sverige, chapter 2. Indoor environment and productivity in offices.

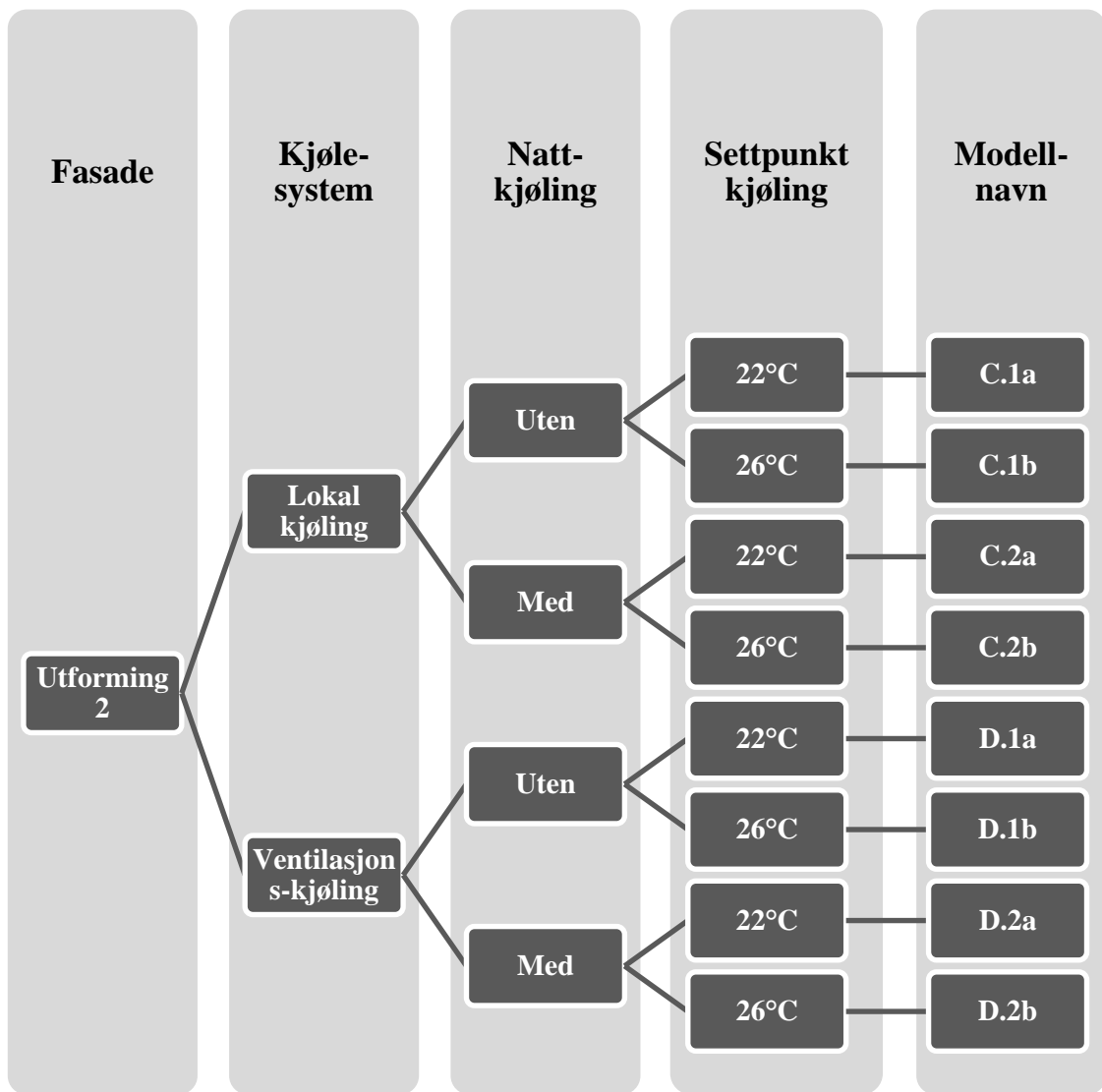
Voldhaug, K. T. (2011), Simulering av energiytelse og inneklime i yrkesbygg med passiv- og lavenergistandard, Fordypningsprosjekt, NTNU.

VEDLEGG

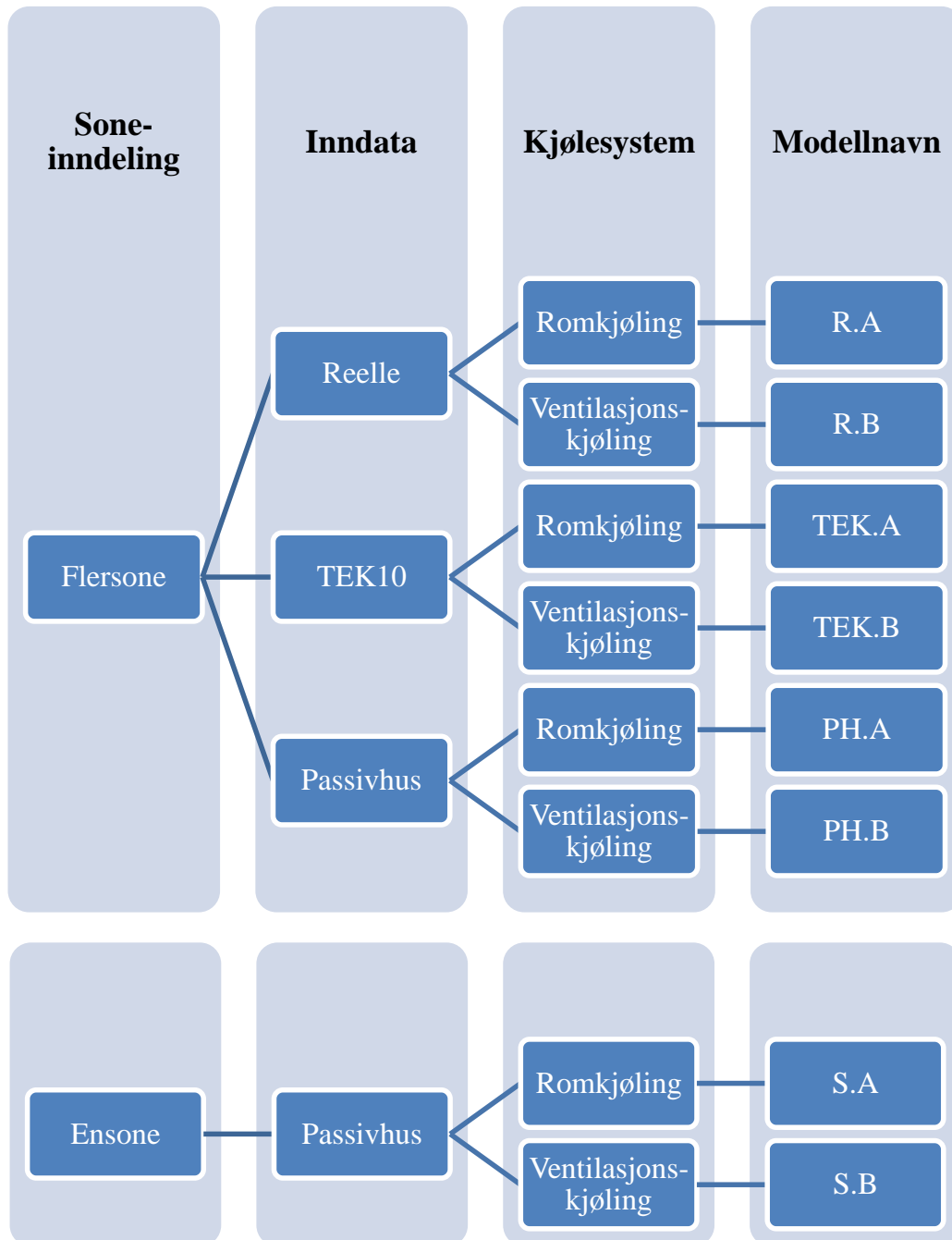
A Simuleringshierarkier



Figur A.1: Simuleringshierarki for reell fasadeutforming



Figur A.2: Simuleringshierarki for alternativ fasadeutforming



Figur A.3: Simuleringshierarki for simulering av hele etasjen

B Beregning av pumpeenergi

Energibehov for pumper skal ved bruk av *NS 3031* (2007) regnes ut som vist i formel B.1.

$$E_p = \dot{V}_W \cdot SPP \cdot t_{dr} [kWh] \quad (\text{B.1})$$

der:

$$\begin{array}{l|l} \dot{V}_W & \text{Sirkulert vannmengde [l/s]} \\ SPP & \text{Spesifikk pumpeeffekt [kW/(l/s)]} \\ t_{dr} & \text{antall driftstimer i året for pumpe [h]} \end{array}$$

Under utformingene av modellene i IDA ICE er det brukt såkalte 'ideelle enheter' for kjøling og oppvarming. Basert på en energibalanse gir dette kjøle- og oppvarmingsbehovet for en sone uten å ta hensyn til plassering av elementer eller eventuelle distribusjonssystemer som kan være en del av løsningen i virkeligheten. For å ta hensyn til dette og få med en realistisk post for pumpeenergi i energibudsjettet, har det blitt gjort en manuell beregning av energibehov for pumper basert på energibehovet for kjøling og oppvarming i de aktuelle modellene.

Vannmengden er etter *NS 3031* (2007) gitt av formel B.2.

$$\dot{V}_W = \frac{\dot{Q}}{\Delta\Theta \cdot C_p \cdot \rho} [l/s] \quad (\text{B.2})$$

der:

$$\begin{array}{l|l} \dot{Q} & \text{varme- eller kjølebehov [W]} \\ \Delta\Theta & \text{temperaturdifferanse tur-returkrets [K]} \\ C_p & \text{vannets spesifikke varmekapasitet [J/(kgK)]} \\ \rho & \text{tetthet for sirkulert væske [kg/m³]} \end{array}$$

B.2 settes inn i B.1, uttrykket gjøres om og slik at det fås en faktor som uttrykker pumpeenergi per kjøle- eller oppvarmingsbehov.

$$K = \frac{E_p}{\dot{Q} \cdot t_{dr}} = \frac{SPP}{\Delta\Theta \cdot C_p \cdot \rho} \quad (\text{B.3})$$

Konstanten for kjøling skal multipliseres med summen av kjølebehovet for sonen lokalt og kjølebehovet for ventilasjonsaggregatet. Konstanten for oppvarming brukes på tilsvarende måte, ved at den multipliseres med summen av oppvarmingsbehov lokalt i sone og oppvarmingsbehov for ventilasjonsaggregat.

Det brukes veiledende verdier fra tillegg I i *NS 3031* (2007) og følgende verdier settes inn i uttrykket:

$$\begin{aligned}
 SPP_{varme} &= 0,5 \text{ kW}/(1/\text{s}) \\
 SPP_{kjøl} &= 0,6 \text{ kW}/(1/\text{s}) \\
 \Delta\Theta_{varme} &= 20 \text{ K} \\
 \Delta\Theta_{kjøl} &= 2,5 \text{ K} \\
 C_{p,vann} &= 4180 \text{ J}/(\text{kgK}) \\
 \rho_{vann} &= 998 \text{ kg}/\text{m}^3
 \end{aligned}$$

De resulterende faktorene som dermed skal multipliseres med kjøle- og oppvarmingsbehov er:

$$\begin{aligned}
 K_{varme} &= 0,00605 \text{ kW}/(1/\text{s}) \\
 K_{kjøl} &= 0,0581 \text{ kW}/(1/\text{s})
 \end{aligned}$$

Post 3b i budsjettet for netto energibehov (se tabell 2.3) beregnes dermed ut som i formel B.4.

$$E_p = K_{varme} \cdot (Q_{h,zone} + Q_{h,AHU}) + K_{kjøl} \cdot (Q_{c,zone} + Q_{c,AHU}) \quad (\text{B.4})$$

der:

$Q_{h,zone}$	netto spesifikt oppvarmingsbehov, sone [kWh/m ² år]
$Q_{h,AHU}$	netto spesifikt oppvarmingsbehov, ventilasjonsaggregat [kWh/m ² år]
$Q_{c,zone}$	netto spesifikt kjølebehov, sone [kWh/m ² år]
$Q_{c,AHU}$	netto spesifikt kjølebehov, ventilasjonsaggregat [kWh/m ² år]