



OSLO METROPOLITAN UNIVERSITY
STORBYUNIVERSITETET

OPPGAVE/KANDIDAT NR.

5

TILGJENGELIGHET

Åpen

OsloMet - storbyuniversitetet
Institutt for Bygg- og energiteknikk
Energi og miljø i bygg

Postadresse: Postboks 4. St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Telefon: 67 23 50 00

www.oslomet.no

MASTEROPPGAVE

MASTEROPPGAVENS TITTEL Termisk komfort under glasstak i glassgårder. Tiltak for forbedring av termisk inneklima.	DATO 23.05.2019
	ANTALL SIDER/ANTALL SIDER I VEDLEGG 64/16
FORFATTER Pernille Lillevand Hem	VEILEDER Ida Bryn
UTFØRT I SAMARBEID MED Erichsen&Horgen, Thon Gruppen & Airtight AS	KONTAKTPERSON Pernille Lillevand Hem

SAMMENDRAG

Glasstak og overlys benyttes i bygninger for å gi tilgang på dagslys, passiv solvarme og redusere behovet for kunstig belysning. Trekkproblematikk gjennom inngangspartier og overoppheting øverst i bygget er ofte utfordringer i høye bygninger med glasstak. En viktig faktor som påvirker dette er trykkforholdet i bygget.

Denne oppgaven har derfor undersøkt hvordan åpningsarealer i klimaskjermen, i form av luftlekkasjer og inngangspartier, påvirker trykkforholdet i bygg. Det er utført simuleringer i IDA ICE for å se hvordan tetting av luftlekkasjer i glasstak påvirker trykkforholdet og hvilken effekt det har for bygg som opplever trekkproblematikk. Det er testet for hvordan solskjerming og vinduslufting kan redusere overoppheting i glassgårder, og hvordan termisk komfort under glasstak påvirkes som følge av tiltakene.

Resultatene viser hvordan et stort undertrykk i høye bygninger er forårsaket av lekkasjer øverst i bygget. Iterasjonsmetoden som er benyttet i oppgaven, for å beregne luftlekkasjer ved Strømmen storsenter, indikerer store luftlekkasjer i glasstaket. For å redusere overoppheting er vinduslufting og solskjerming svært nødvendig.

3 stikkord:

Glasstak

Termisk oppdrift

Trykkforhold

Prosjektbeskrivelse

Tittel: Termisk komfort under glasstak i glassgårder. Tiltak for forbedring av termisk inneklima.

Oppgaven skrives i samarbeid med Erichsen & Horgen, Thon Gruppen og Airtight AS, med Ida Bryn (Erichsen & Horgen) som veileder.

Glasstak og overlys er mye benyttet i forbindelse med kommunikasjonsarealer for å gi god tilgang på dagslys, passiv solvarme og redusere behovet for kunstig belysning. Erfaring viser dessverre en rekke utfordringer med glasstak, spesielt i forbindelse med høye bygninger. På vinteren er det stor trekkproblematikk ved inngangspartiene, som fører til diskomfort for brukerne og høyt varmebehov. Inngangspartier som står mye åpne skaper ofte store utfordringer på kjøpesentere. Samsillet mellom inngangspartier og glasstak vil være spesielt viktig for denne masteroppgaven. På sommeren og ved vårjevndøgn er det, på grunn av termisk oppdrift og soltilskudd, utfordringer med overoppheting i øverste del av bygget. Det fører til høye temperaturer og et økt kjølebehov. Ski og Strømmen storsenter opplever disse utfordringene. Eventuelle lekkasjer i glasstaket vil påvirke trykkforholdet i bygget og forårsake trekk gjennom inngangspartier nederst i bygget. Dagens praksis tar for lite hensyn til de store drivkreftene forårsaket av termisk oppdrift og hvordan trykkforhold i bygget påvirker luftstrømmer og termisk inneklima.

Denne oppgaven skal derfor se på hvordan åpninger i klimaskjermen, i form av luftlekkasjer og inngangspartier, påvirker trykkforholdet i bygg. Ved å modellere en modell av Strømmen storsenter i IDA ICE skal det undersøkes om eventuelle lekkasjer er årsaken til et stort undertrykk i bygget. Det skal testes for hvordan tetting av tak, solskjerming og vinduslufting vil påvirke termisk komfort under glasstak. For å undersøke dette skal det utføres både fysiske målinger og simulering i IDA-ICE. Oppgaven vil gi økt kunnskap om trykkforhold i bygninger og hvordan ulike tiltak vil påvirke termisk komfort. Kunnskapen kan benyttes til fremtidig prosjektering av klimatiseringsløsninger for høye bygninger med bruk av glasstak.

Forord

Masteroppgaven har vært et samarbeid med Erichsen&Horgen, Thon Gruppen og Airtight AS, hvor utfordringer med trekk og overoppheting ved Ski og Strømmen storsenter var utgangspunktet for oppgaven. Oppgaven som er et reelt case, med potensial for stor forbedring, har derfor vært motivasjonen for denne oppgaven.

Under arbeidet med masteroppgaven har jeg fått god hjelp av mange, enten det er med små eller større deler av oppgaven. Takk til veileder Ida for enorm faglig dyktighet og god veiledning gjennom hele masterprosessen. Takk til medstudent Toril for sparring og hyggelige stunder gjennom våren. Takk til Thon Gruppen og Ole ved Strømmen storsenter for tilgjengelighet og interesse for oppgaven. Takk til Per Magne og Bjørnar i Airtight AS for tilgang på målinger. Takk til Erichsen&Horgen for interesse for oppgaven og et hyggelig opphold hos dere. Takk til Marte i Erichsen&Horgen for god hjelp med IDA ICE. Takk til samboer Lars for ditt smittende humør og tålmodighet. Takk til Merete for korrekturlesing av oppgaven.

Å fordype seg i masteroppgaven har vært en lærerikt og spennende prosess. Gjennom arbeidet har mye tid gått til programmet IDA ICE og jeg tar med meg kunnskapen videre i arbeidslivet. Etter mange lærerike år på skolen kan jeg nå kalle meg en ekte ingeniør, og takker med det for fine år på både HiOA og OsloMet.

Pernille Lillevand Hem
Oslo, 23. mai 2019

Definisjoner

Airtight:	Selskapet som har utført trykk- og temperaturmålinger ved Strømmen storsenter.
Atrium:	Åpent overbygget rom i et offentlig bygg.
CAV:	Constant air volume. Konstant luftstrøm, uten behovstyring.
Differansetrykk:	Differansen mellom trykket inne og ute på et gitt sted i bygget.
Eksfiltrasjon:	Luftlekkasje ut av bygget.
Glassgård:	Bygningsvolum innkledd med glass. Benyttet i oppgaven tilsvarende høyt bygg med glasstak.
Grunnlagsmodell:	Modellen som benyttet som utgangspunkt ved simulering av Strømmen storsenter i IDA ICE.
IDA ICE:	IDA Indoor Climate and Energy simulation software.
Infiltrasjon:	Luftlekkasje inn i bygget.
Klimaskjerm:	Ytterkonstruksjonen i en bygning.
Nøytralplan:	Overgangen mellom overtrykk og undertrykk i en bygning. Ved nøytralplanet er trykket inne lik trykket ute.
Op. temp:	Operativ temperatur, middelerdi mellom gjennomsnittlig stråletemperatur og lufttemperatur.
Overtrykk:	Benyttes i bygninger når trykket inne er større enn ute.
PI:	Proporsjonal Integrasjon. Et reguleringsprinsipp for regulering av blant annet solskjerming og vinduslufting.
TEK17:	Byggteknisk forskrift.
Termisk oppdrift:	Varm luft som stiger fordi den er lettere en kald luft. Drivkraften bak naturlig ventilasjon.
Termisk sjikt:	Også kalt for termisk lagdeling. Luft med ulik temperatur vil danne lag over hverandre, hvor varm luft ligger øverst.
Trykkforhold:	Benyttet i oppgaven som trykkdifferansen mellom inne og ute for et gitt sted i bygget.
Undertrykk:	Benyttes i bygninger når trykket inne er lavere enn ute.

Sammendrag

Glasstak er mye benyttet i forbindelse med kommunikasjonsarealer for å gi god tilgang på dagslys og solvarme, i tillegg til å redusere behovet for kunstig belysning. Erfaring viser utfordringer med trekk og overoppheting, i spesielt eldre bygg. Dagens praksis tar lite hensyn til trykkforholdene i bygget når det skal dimensjoneres for klimatiseringsløsninger for slike bygg.

Trykkforholdet i bygninger er forårsaket av forholdet mellom åpninger i klimaskjermen og differansen mellom inne- og utetemperatur. Trykkdifferansen vertikalt i bygget vil øke med synkende utetemperatur. Åpninger øverst i bygget vil forårsake et undertrykk, og motsatt vil åpninger nederst i bygget gi et overtrykk. Som følge av skorsteinseffekten vil ikke temperaturen i høye glassgårder være homogen. Grunnet termisk oppdrift og stort varmetilskudd fra sola kan temperaturen øverst i bygget bli svært høy.

Oppgavens resultat viser hvordan åpninger i klimaskjermen og differansen mellom inne- og utetemperatur påvirker trykkforholdet i bygget. Et undertrykk i bygget, ved lukkede dører og uten påvirkning fra ventilasjon, indikerer luftlekkasjer øverst i bygget. Luftlekkasjene vil gi økt trekkproblematikk gjennom innganger i 1. etasje og andre områder i bygget hvor det er stort undertrykk. Tetting av luftlekkasjer i tak vil derfor være viktigste tiltak for å redusere trekk.

Simulering i IDA ICE viser hvordan solskjerming og vinduslufting kan redusere overoppheting forårsaket av høyt varmetilskudd fra sola og termisk oppdrift. Ulike typer solskjermingsløsninger vil ha ulik effekt, og må derfor vurderes nøye ut fra behov. Ved stort varmetilskudd gjennom glasstaket vil utvendig solskjerming gi størst effekt. Vinduslufting vil, i motsetning til solskjerming, påvirke trykkforholdet og dermed også luftstrømmene i bygget. Om våren vil vinduslufting være hensiktsmessig ved stort varmetilskudd fra sola, men gi fare for trekk ved lave utetemperaturen. Om sommeren vil vinduslufting være hensiktsmessig ved stort varmetilskudd fra sola, men vil gi negativ effekt dersom utetemperaturen er høyere enn innnetemperaturen. Ved bruk av glasstak, spesielt i gamle høye bygg, vil tiltakene som testet i oppgaven være svært relevante. Et behov for å implementere påvirkning av trykkforhold ved klimatisering av glassgårder vises i oppgaven.

Abstract

Glass roofs are widely used in connection with communication areas to provide good access to daylight and solar heat, as well as to reduce the need for indoor lighting. Experience shows challenges with draft and overheating, especially in older buildings. Today's practice takes insufficient consideration of the pressure conditions in the building when designing for air conditioning for such buildings.

Pressure ratio in buildings is caused by the relationship between openings in the climate screen and the difference between indoor and outdoor temperatures. The pressure difference vertically in the building will increase with decreasing outdoor temperature. Openings at the top of the building will cause a negative pressure and, conversely, openings at the bottom of the building will give an overpressure. As a result of the chimney effect, the temperature in tall glasshouses will not be homogeneous. Due to thermal buoyancy and large heat addition from the sun, the temperature at the top of the building can be very high.

The results shows how openings in the climate screen and the difference between indoor and outdoor temperature affects the pressure ratio in the building. An underpressure in the building, at closed doors and without the influence of mechanical ventilation, indicates air leaks at the top of the building. The air leaks will cause increased draft problems through entrances on the ground floor and other areas in the building where there is large underpressure. Sealing of air leaks in the roof will therefore be the most important measures to reduce drafts.

Simulation in IDA ICE shows how sunscreen and window ventilation can reduce overheating caused by high heat input from the sun and thermal buoyancy. Different types of sunscreens will have different effects, and must therefore be carefully considered on the basis of needs. In the case of a large heat supplement through the glass roof, external sun protection will give the greatest effect. Window ventilation, in contrast to sunscreen, will affect the pressure ratio and thus also the air flows in the building. When using a glass roof, especially in old tall buildings, the measures tested in the task will be very relevant. A need for implementing the influence of pressure conditions in the air conditioning of glassbuildins is shown in the assignment.

Innhold

Prosjektbeskrivelse	i
Forord	ii
Definisjoner	iii
Sammendrag	iv
Abstract	v
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål	1
1.3 Krav og anbefalinger	2
1.3.1 Energi	2
1.3.2 Termisk inneklima	2
1.3.3 Dagslys	3
1.4 Problemstilling og hypotese	4
2 Teori	5
2.1 Termisk oppdrift	5
2.2 Trykkforhold	7
2.2.1 Nøytralplan	9
2.2.2 Trykkoptimalisering med mekanisk ventilasjon	10
2.3 Infiltrasjon og eksfiltrasjon	11
2.4 Glasstak og overlys	12
2.4.1 Solskjerming	13
2.4.2 Vinduslufting	15
2.5 Termisk komfort	15
3 Metode	18
3.1 Strømmen storsenter	18
3.2 Airtight målinger	18
3.3 Feltmålinger	20
3.4 IDA-ICE modell	20
3.4.1 Inndata	21
3.4.2 Åpninger i klimaskjermen	24
3.5 Simulering av tiltak	25
3.5.1 Tetting av tak	25
3.5.2 Solskjerming	26
3.5.3 Vinduslufting	27
4 Resultat	28

4.1	Airtight målinger	28
4.2	IDA ICE modell	30
4.2.1	Lekkasjeareal	30
4.2.2	Trykkforhold	31
4.2.3	Temperaturforhold	32
4.2.4	Luftstrømmer gjennom åpninger i klimaskjermen	35
4.2.5	Modeller for utvalgte dager	38
4.3	Simulering av tiltak	41
4.3.1	Tetting av tak	41
4.3.2	Solskjerming	48
4.3.3	Vinduslufting	51
5	Diskusjon	57
5.1	Sammendrag av resultater	57
5.2	Airtight målinger	57
5.3	IDA ICE modell	59
5.4	Sammenligning av airtight og IDA ICE	61
5.5	Vurdering av tiltakene	61
5.6	Videre arbeid	63
6	Konklusjon	64
	Referanser	65
	Vedlegg	67
A	Utforming av glassgårder	67
B	Plantegning Strømmen storsenter	68
B.1	1. etasje	68
B.2	2. etasje	69
B.3	2. etasje	70
C	Airtight	71
C.1	Airtight målepunkter	71
C.2	Airtight måleresultat hele perioden	72
C.3	Airtight måleresultat 18. oktober og 23. november	73
D	Feltmålinger	74
D.1	Målepunkter	74
D.2	Måleresultat	75
E	IDA ICE	76
E.1	Simuleringspråk	76
E.2	Klimamodell	76

E.3	IDA ICE klimadata	77
E.4	Trykkforhold 2019	78
E.5	Temperaturforhold 2019	80
E.6	Luftstrømmer 2019	81
E.7	Temperatur IDA ICE: tilluft, avtrekk og ute	82
E.8	Klimadata IDA ICE	83

Figurer

2.1	Skorsteinseffekten	5
2.2	Vertikal temperaturprofil	6
2.3	Enkeltcelle med én åpning.	8
2.4	Enkeltcelle med to åpninger.	9
2.5	Parallellforskyving av nøytralplanet	10
2.6	Innelukket glassgård	12
3.1	Plantegning Strømmen storsenter	21
3.2	Modell IDA ICE	23
3.3	Åpningsgrad dør 1. etasje	24
3.4	Aktivering av vinduslufting	27
4.1	Airtight trykk- og temperaturmålinger	29
4.2	Trykkforhold grunnlagsmodell	31
4.3	Temperaturforhold grunnlagsmodell	33
4.4	Op. temp ved ulike plassering av bruker	34
4.5	Luftstrøm gjennom dør grunnlagsmodell	35
4.6	Luftstrøm gjennom glasstak grunnlagsmodell	37
4.7	Modell trykkforhold vinter	38
4.8	Modell trykkforhold sommer	39
4.9	Trykkforhold ved tetting av tak 15. januar	41
4.10	Temperaturforhold ved tetting av tak 15. januar	42
4.11	Luft gjennom dør ved tetting av tak 15. januar	43
4.12	Trykkforhold tetting av tak 16. april	43
4.13	Temperaturforhold ved tetting av tak 16. april	44
4.14	Luft gjennom inngangsdør ved tetting av tak 16. april	45
4.15	Trykkforhold ved tetting av tak 15. juli	46
4.16	Temperaturforhold ved tetting av tak 15. juli	47
4.17	Luft gjennom inngangsdør ved tetting av tak 15. juli	48
4.18	Temperaturforhold solskjerming 16. april	49
4.19	Temperaturforhold solskjerming 15. juli	50
4.20	Trykkforhold vinduslufting 16. april	51
4.21	Luftstrømmer vinduslufting 16. april	52
4.22	Temperaturforhold vinduslufting 16. april	53
4.23	Trykkforhold vinduslufting 15. juli	54
4.24	Luftstrømmer vinduslufting 15. juli	55
4.25	Temperatur vinduslufting 15. juli	56

B.1	Plantegning 1. etasje	68
B.2	Plantegning 2. etasje	69
B.3	Plantegning 3. etasje	70
C.1	Airtight trykk- og temperaturmålinger hele måleperioden	72
C.2	Airtight trykk- og temperaturmålinger 18. oktober	73
C.3	Airtight trykk- og temperaturmålinger 23. november	73
D.1	Målepunkter feltmålinger lufthastighet	74
E.1	Klimafil IDA ICE	77
E.2	Trykkforhold etasjer IDA ICE hele 2019	78
E.3	Trykkforhold IDA ICE glasstak hele 2019	79
E.4	Temperaturforhold IDA ICE etasjer og glasstak hele 2019	80
E.5	Luftstrøm inngangsdør IDA ICE hele 2019	81
E.6	Luftstrøm lekkasjer i glasstak IDA ICE hele 2019	81
E.7	Temperatur for tilluft, avtrekk og ute i IDA ICE.	82
E.8	Klimadata i IDA ICE	83

Tabeller

1.1	Minimumskrav til energieffektivitet, TEK17.	2
1.2	Krav til termisk inneklime.	2
2.1	Viktige faktorer ved prosjektering av glassgårder.	13
2.2	Parametere termisk komfort	16
3.1	Måledager hentet ut fra Airtight	19
3.2	Inndata IDA ICE modell	22
3.3	Egenskaper glass og solskjerming IDA ICE	26
4.1	Lekkasjeareal modellert i IDA ICE.	30
E.1	Klimamodell IDA ICE	76

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Glasstak og overlys er mye benyttet i forbindelse med kommunikasjonsarealer som kjøpesentere, skoler og næringsbygg. Glasstak gir god tilgang på dagslys, passiv solvarme og reduserer behovet for kunstig belysning. Erfaring viser dessverre en rekke utfordringer med trekk og overoppheting. Disse utfordringene er svært representative for både Ski og Strømmen storsenter, og bakgrunn for denne masteroppgaven. Ved å undersøke hvordan trykkforholdene i bygget varierer gjennom døgnet og ved ulike årstider, kan det gi ny kunnskap som kan brukes til fremtidig klimatisering av glassgårder. Det skal testes for ulike tiltak for å forbedre trekk og overoppheting i høye bygninger med glasstak.

1.2 Mål

Hovedmål for oppgaven er å se hvordan trykkforskjeller i bygninger påvirker termisk komfort og gjøre rede for samspillet mellom glasstak og inngangspartier. For å finne bedre løsninger på trekkproblematikk og overoppheting er det utarbeidet tre delmål for oppgaven:

1. Kartlegge nåsituasjon og benytte IDA ICE for å dokumentere effekten av tiltak.
2. Foreslå ulike løsninger for å utbedre termisk komfort ved glasstaket. Se hvordan de ulike løsningene påvirker trykkforholdene i glassgården, samt hvordan de påvirker termisk komfort i glassgården totalt.
3. Lage retningslinjer for dimensjonering av gode løsninger.

1.3 Krav og anbefalinger

I denne seksjonen er det listet opp relevante krav i henhold til TEK17 [1]. Kravene er benyttet i oppgaven ved vurdering av tiltak.

1.3.1 Energi

Minimumskravet til U-verdi og lekkasjetall i henhold til TEK17 er presentert i tabell 1.1 [1].

Tabell 1.1: Minimumskrav til energieffektivitet i henhold til TEK17 § 14-3.

U-verdi yttervegg [W/(m ² K)]	U-verdi tak [W/(m ² K)]	U-verdi gulv på grunn og mot det fri [W/(m ² K)]	U-verdi vindu og dør inkludert karm/ramme [W/(m ² K)]	Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell (luftveksling per time)
≤0,22	≤ 0,18	≤ 0,18	≤ 1,2	≤ 1,5

1.3.2 Termisk inneklima

Byggteknisk forskrift § 13-4 første ledd, gir generelle krav til termisk komfort i rom for varig opphold. Anbefalte verdier for operativ temperatur ut fra aktivitetsgruppe er vist i tabell 1.2 [1].

Tabell 1.2: Anbefalte verdier for operativ temperatur (samlet virkning av lufttemperatur og termisk stråling) i henhold til TEK17 § 13-4.

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

TEK17 har følgende kommentar til vedlagte verdier for operativ temperatur [1]:

“På dager med høy utetemperatur er det vanskelig å unngå at temperaturen innendørs blir høyere enn de anbefalte verdier. Overskridelse av den høyeste grensen bør derfor kunne aksepteres i varme sommerperioder med utelufttemperatur over den som overskrides med 50 timer i et normalår (se meteorologiske statistiske data for maksimaltemperaturer)”.

Passive tiltak som kan bidra til å unngå overtemperatur er for eksempel[1]:

- Redusert vindusareal i solbelastede fasader
- Eksponert termisk masse
- Utvendig solskjerming
- Åpningsbare vinduer som gir mulighet for gjennomlufting og plassering av luftinntak/utforming av ventilasjonsanlegg slik at temperaturstigning i anlegget på grunn av høy utetemperatur blir minimal ($<2\text{ }^{\circ}\text{C}$)

1.3.3 Dagslys

TEK17 § 13-7 første ledd gir generelle krav til at byggverk skal ha tilfredstillende tilgang på dagslys, hvor det står følgende [1]:

“Lysforholdene er av stor betydning for menneskets helse og trivsel, og avgjørende for hvor raskt og sikkert vi kan utføre en arbeidsoperasjon. Dagslys er den belysningsformen som vanligvis oppleves å være den beste og mest riktige allmennbelysningen. Dagslysfaktor angir forholdet mellom belysningsstyrke mot en horisontal flate inne og en tilsvarende horisontal flate ute med fri horisont og jevnt overskyet himmel.”

Annet ledd gir krav om at rom for varig opphold skal ha tilfredsstillende tilgang på dagslys. Mengde dagslys bestemmes av følgende faktorer [1]:

- Vinduenes areal
- Vindets plassering
- Skjerming fra terrenget
- Skjerming fra andre byggverk
- Rommets høyde, dybde samt refleksjonsegenskapene til de ulike overflatene i rommet

1.4 Problemstilling og hypotese

Basert på målene som har blitt satt for oppgaven og utfordringer ved Ski og Strømmen storsenter er det satt følgende problemstillinger:

1. *Hvordan påvirker åpningsarealer og plassering av luftlekkasjer trykkforhold i bygget? Hvordan vil trykkforholdet påvirke termisk komfort?*

Dersom ulik fordeling av åpningsarealer og luftlekkasjer i bygget har stor påvirkning på termisk komfort i bygget, vil et større fokus på dette være viktig ved fremtidig prosjektering av klimatiseringsløsninger i glassgårder. For å vurdere problemstilling 1 er det benyttet målinger utført av Airtight AS for å analysere trykkforholdene ved Ski og Strømmen storsenter. IDA ICE er benyttet for å teste for ulike fordeling av åpningsareal og luftlekkasjer i bygget.

2. *Hvordan vil tetting av tak, solskjerming og vinduslufting påvirke trekk og overoppheting i høye kommunikasjonsarealer? Hvordan vil en optimal løsningen av tetting av tak, solskjerming, vinduslufting påvirke termisk komfort i bygget?*

Dersom luftlekkasjer i glasstak er største årsak til økt termisk oppdrift og trekkproblematikk i inngangspartier vil tetting av tak være viktigste tiltak for å unngå trekk. Det vil derfor være hensiktsmessig å utføre dette tiltaket fremfor luftporter og struping på avtrekk på ventilasjonsanlegget som er vanligere å utføre i dag. Dersom solskjerming og vinduslufting kan minimere overoppheting vil det redusere behovet for kjøling og øke komforten for brukerne av bygget. For å vurdere problemstilling 2 er det utført simulering i IDA ICE for å vurdere termisk komfort i bygget etter nevnte tiltak.

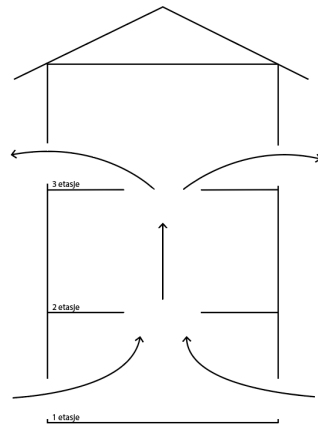
Hypotese

Lekkasjer i øvre del av Ski og Strømmen storsenter vil forårsake et undertrykk i store deler av bygget og være årsaken til trekk gjennom inngangspartier og overoppheting i øvre del. Tetting av tak vil forbedre trekkproblemer ved senterne og en optimal løsning med solskjerming og vinduslufting vil kunne redusere overoppheting. En forståelse av trykkforhold vil være vesentlig for riktig klimatisering av bygg.

2 Teori

2.1 Termisk oppdrift

Termisk oppdrift, også kalt for skorsteinseffekten, skyldes densitetsforskjell mellom inne- og uteluft [2]. Varm luft er lettere enn kald luft. Skorsteinseffekten oppstår når luft blir varmet opp og stiger, fordi den blir fortrenget av kaldere og tyngre luft. Luften i en bygning blir varmet opp av interne laster som personer, soltilskudd, teknisk utstyr eller andre varmekilder i rommet. Skorsteinseffekten i en tre etasjes bygning er illustrert i figur 2.1.



Figur 2.1: Lufttrykkfordeling over høyden i en treetasjes bygning på grunn av skorsteinseffekten. Pilene illustrerer luftlekkasjer som går fra høyere til lavere trykk og varm luft som stiger. Egen illustrasjon.

Matematisk blir oppdrift beskrevet ut fra Arkimedes' lov [3], hvor oppdriftskraften er beskrevet som vist i likning 2.1. Oppdriftskraften øker jo større volum og densitetsforskjell.

$$F = -g \cdot V \cdot \Delta\rho \quad (2.1)$$

Hvor:

F = Oppdriftskraften [N]

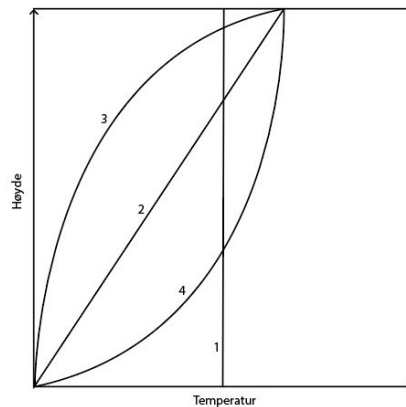
g = Tyngnekraft. Oslo: 9.819 m/s^2

V = Volum av væsken [m^3]

ρ = Differansen mellom tettheten til varm og kald luft [kg/m^3]

Skorsteinseffekten vil skape en lufttrykkfordeling over høyden i bygget. Det dannes et undertrykk nederst i bygget og et overtrykk øverst i bygget. Overgangen mellom undertrykk og overtrykk kalles nøytralplanet. Størrelsen på overtrykket over nøytralplanet er avhenging av temperaturforhold, bygningens høyde og fordeling av areal av åpninger i klimaskjermen [2]. I henhold til byggdetaljeblad 421.132 “Fukt i bygninger” [2] er tommelfingerregelen at maksimalt overtrykk på grunn av temperaturforskjell mellom ute og inne ca. 1 Pa per m høyde i middels kalde strøk av landet. Høyden regnes fra nøytralplanet, som normalt ligger omtrent ved halve høyden av bygget. Mer detaljert om trykkforhold i bygninger er beskrevet i kapittel 2.2.

Som følge av skorsteinseffekten er ikke temperaturen i høye bygninger homogen, men vil øke med høyden av bygningen. I horisontal retning er temperaturen tilsvarende konstant [4]. Prosjekt A.3 “Atrium Model Development” [5], publisert av SINTEF Energi, har definert fire mulige vertikale temperaturfordelinger i høye atrier, som vist i figur 2.2.



Figur 2.2: Vertikal temperaturprofil. Egen illustrasjon.

1. **Konstant temperatur:**
Typisk for fullstendig blandet luft.
2. **Lineær økning av temperaturen:**
Typisk for atrier hvor varmekilden er uniformt distribuert.
3. **Rask økning av temperaturen i øvre del:**
Representerer tilfellet hvor varmekilden distribueres i øvre del.
4. **Rask økning av temperaturen i nedre del:**
Representerer tilfellet hvor varmekilden distribueres ved gulvet.

Temperaturprofil nr 3 (rask økning av temperatur i øvre del) er mest vanlig for høye atrier [5]. Luften stiger og blir varmet opp i øvre del på grunn av solinnstråling gjennom glasstaket. Solskjerming kan forsterke denne effekten ved at solvarmen ikke blir fordelt lenger ned i glassgården [5]. En slik temperaturprofil gjør det utfordrende å sette settpunkter for temperatur i ulike områder i bygget. Dersom andre varmekilder er plassert fra midten av bygget og oppover i rommet, vil det forsterke termisk sjiktning. Temperaturen over varmekilden øker og luften vil kun blandes over varmekilden. Dersom varmekilden er plassert i nederste plan, vil det dannes en tilbakestrømning som gjør at luften i hele rommet blandes [5]. Følgende parametere kan øke termisk oppdrift [5]:

- Høyde
- Varmetilførsel i øvre del av rommet
- Ikke åpnbare luker
- Lite luftbevegelse
- Solskjerming

Termisk oppdrift har ulik effekt avhengig om det er oppvarmingsbehov eller kjølebehov. Om sommeren kan termisk oppdrift være positivt for termisk komfort i nedre del av bygget, men kan være en stor utfordring i øvre del. Om vinteren vil termisk oppdrift være en utfordring, da soner i øvre del må overoppvarmes for at nedre del skal oppnå akseptabel temperatur.

Dersom luften kjøles ned, oppstår motsatt effekt. Den kalde og tyngre luften faller ned og skaper en luftbevegelse nedover. Kaldras oppstår dersom luften avkjøles av flater med lavere overflatetemperatur. Kaldras oppleves som ubehagelig trekk langs gulvet.

2.2 Trykkforhold

Trykk er innenfor fysikken definert som kraft per areal ($P=F/A$) og måles i SI-enheten Pascual ($\text{Pa}=\text{N}/\text{m}^2$). Trykkforskjellen over klimaskjermen i bygninger måles som differansetrykket mellom inne og ute. Trykkdifferansen kan beregnes ut fra likning 2.2 [4]. Likningen gjelder når $T_{inne} > T_{ute}$.

$$\Delta P = P_i - P_u = \rho \cdot \left(\frac{273}{T_o} - \frac{273}{T_i} \right) \cdot g \cdot z \quad (2.2)$$

Hvor:

ΔP = Differansetrykket over klimaskjermen [Pa]

ρ = Lufttetthet [kg/m^3]

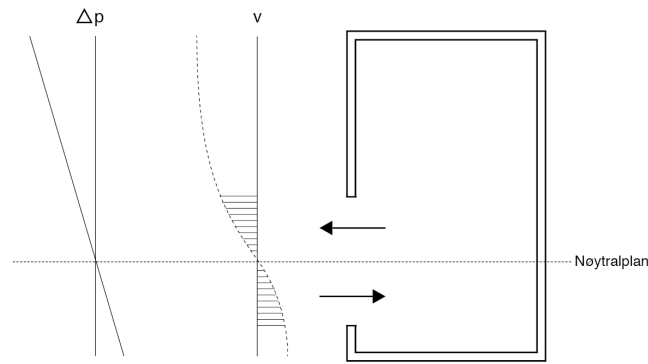
T_i = Temperatur inne [$^{\circ}\text{C}$]

T_o = Temperatur ute [$^{\circ}\text{C}$]

g = Tyngvekraften. Oslo: $9.819 \text{ m}/\text{s}^2$

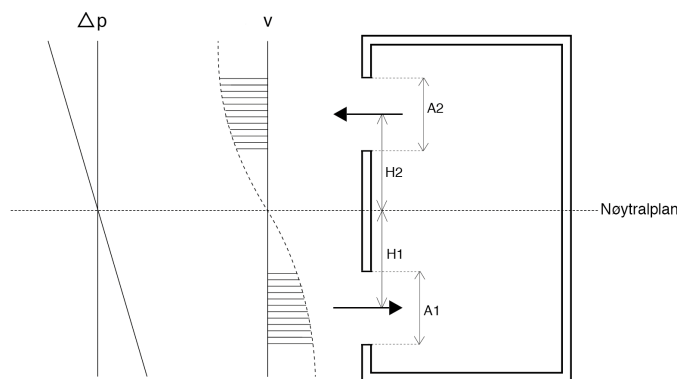
z = Høyden fra nøytralplan til åpning [m]

Ved kun én åpning i klimaskjermen vil nøytralplanet ligge omtrent midt i åpningen. I nøytralplanet er differansetrykket mellom ute og inne 0 Pa. Dette vil gi en luftstrøm som kun vil strømme inn i den nedre del av åpningen og ut i den øvre del av åpningen [5]. En enkeltcelle med én åpning er illustrert i figur 2.3.



Figur 2.3: Enkeltcelle med én åpning i første plan. Illustrasjon fra medstudent.

Ved to åpninger i klimaskjermen vil nøytralplanet ligge omtrent midt mellom åpningene. Dette vil gi en luftstrøm som vil gå inn den nedre åpningen og ut gjennom den øvre åpningen [5]. En enkeltcelle med to åpninger er illustrert i figur 2.4.



Figur 2.4: Enkeltcelle med to åpninger i forskjellige plan. Illustrasjon fra medstudent.

Trykkforskjell over to åpninger i klimaskjermen kan beregnes ut fra likning 2.3 [5].

$$\Delta P_1 = \rho_1 g H_1 = \frac{\rho \Delta T g H_1}{T_i} \quad \text{og} \quad \Delta P_2 = \rho_2 g H_2 = \frac{\rho \Delta T g H_2}{T_o} \quad (2.3)$$

Hvor:

$$H_1 = H_2 = H$$

ΔP = Differansetrykket over åpningen [Pa]

ρ = Lufttetthet [kg/m^3]

g = Tyngekraften. Oslo: $9.819 \text{ m}/\text{s}^2$

T_i = Temperatur inne [$^{\circ}\text{C}$]

T_o = Temperatur ute [$^{\circ}\text{C}$]

H = Høyden fra nøytralplan til åpning [m]

2.2.1 Nøytralplan

Nøytralplanets plassering bestemmes ut fra bygningens høyde og åpningsareal og kan beregnes ut fra likningene 2.4 [4].

$$H_1 = \frac{H}{1 + m} \quad \text{og} \quad m = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (2.4)$$

Hvor:

H_1 = Høyden fra midten av åpning A_1 til nøytralplan [m]

H = $H_1 + H_2$ = Skorsteinshøyden [m]

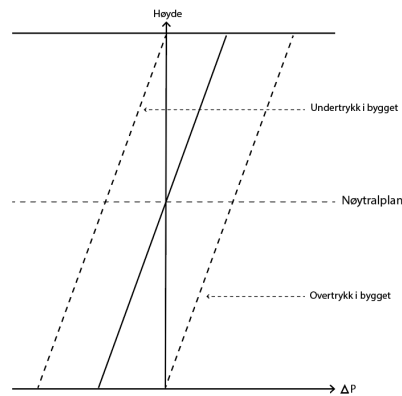
$m =$ Forholdstall

$A_2 =$ Areal til inngang over nøytralplan [m^2]

$A_1 =$ Areal til inngang under nøytralplan [m^2]

Dersom forholdstallet m går mot null, vil åpninger over nøytralplanet (A_2) bli mye større enn åpninger under nøytralplanet (A_1). Dette vil gi et høyt nøytralplan og et undertrykk i store deler av bygget. Dersom forholdstallet m går mot uendelig, vil åpninger over nøytralplan (A_2) bli mye mindre enn åpninger under nøytralplan (A_1). Dette vil gi et lavt nøytralplan og overtrykk i store deler av bygget. En klimaskjerm uten lekkasjer (et helt tett bygg) og én åpning nederst i bygget vil gi sistnevnte resultatet [4].

Ved å justere åpningene i klimaskjermen parallellforskyves ΔP -linjen [4]. Dersom det kun er en åpning i klimaskjermen vil nøytralplanet ligge midt i åpningen. Ved undertrykk i bygget vil trykkdifferansen parallellforskyves mot venstre, slik at nøytralplanet ligger høyt i bygget. Ved overtrykk i bygget vil trykkdifferansen parallellforskyves mot høyre, slik at nøytralplanet ligger lavt i bygget. Parallellforskyving av nøytralplanet er illustrert i figur 2.5.



Figur 2.5: Parallellforskyving av nøytralplanet. Egen illustrasjon.

2.2.2 Trykkoptimalisering med mekanisk ventilasjon

Trykkoptimalisering med mekanisk ventilasjon kan endre trykkdifferansen i bygget på tilsvarende måte som beskrevet i forrige delkapittel. Ubalanse mellom tilluft og avtrekk kan bidra til å skape trykkubalanse i bygget [6]. En slik feil kan være vanskelig å oppdage dersom SD-anlegget likevel måler lik luftmengde på tilluft og avtrekk. Trykkoptimalisering ved bruk av ventilasjon kan utføres ved å aktivt endre på forholdet mellom tilluft og avtrekk. Ved å tilføre mer luft eller strupe på avtrekk vil trykkkurven parallellfor-

skyves (fra figur 2.5) mot høyre og øke trykket i bygget. Ved å tilføre mindre luft eller øke avtrekk vil trykkkurven parallellforskyves mot venstre og redusere trykket i bygget. Det er i denne oppgaven ikke testet for trykkjustering av bygget ved bruk av mekanisk ventilasjon.

2.3 Infiltrasjon og eksfiltrasjon

Luftlekkasje gjennom klimaskjermen oppstår når det er trykkforskjell mellom inne og ute og utettheter i bygningen. Luftlekkasjer kan forekomme inn eller ut gjennom klimaskjermen, som henholdsvis infiltrasjon og eksfiltrasjon. Drivkreftene bak trykkforskjeller er vind, temperaturforskjell mellom inne og ute og mekanisk generelt trykk fra ventilasjon [7]. I tillegg til nevnte faktorer er det også andre faktorer som kan ha betydning for byggets energibruk, komfort og fukt i bygningskroppen; klima, bygningsform, retning og lokasjon. I høye bygninger vil termisk oppdrift være viktigste faktor. Høye bygninger er også utsatt for høyere vindhastighet. Luftlekkasjer i bygninger kan, tilsvarende kuldebroer, deles inn i ulike kategorier [7]:

1. Arealavhengig: Lekkasjene er jevnt fordelt gjennom yttervegg, gulv og tak eller elementer i fasaden som glassfasader, vinduer og dører.
2. Lengdeavhengig: Lekkasjene er gjennom fuger og tilslutninger mellom ulike konstruksjoner eller mellom fasadelementer som glassfasader, vinduer og dører.
3. Punktvis: Luftlekkasjene er gjennom elektriske føringer, ventilasjonskanaler, vann- og avløpskanaler eller gjennom bærekonstruksjoner som bjelker og søyler.

Krav til bygningens tetthet blir satt gjennom lekkasjetallet n_{50} . Tallet angir hvor mange ganger byggets oppvarmede luftvolum lekker ut gjennom utettheter i klimaskjermen per time ved 50 Pa trykkforskjell over klimaskjermen. Lekkasjetallet beregnes etter likning 2.5 [7]:

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \quad (2.5)$$

Hvor:

V_{50} = samlet lekkasjeluftmengde ved 50 Pa trykkforskjell mellom inne og ute [m^3/h]

V = volum av lekkasjemålt bygningsdel [m^3]

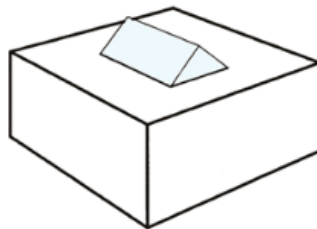
Lekkasjetallet måles ved 50 Pa trykkforskjell mellom inne og ute, men normalt er trykkforskjellen lavere enn dette [7]. Mengden luftlekkasjer er relatert til arealet av byggets klimaskjerm, mens lekkasjekravet i TEK17 settes etter bygningens innvendig volum [1]. Forholdet mellom fasadeareal og volum er derfor viktig. Dersom bygningen har et stort fasadeareal, kan det være nødvendig å sette strengere krav til tetthet i fasaden for å oppnå kravet til lekkasjetall [7].

2.4 Glasstak og overlys

Fasaden er byggets klimaskall og utveksler energi med omgivelsene med store variasjoner gjennom året. Sol tilfører bygget energi gjennom dagslys og solvarme. Motsatt vil bygget miste energi på grunn av varmetap gjennom ulike deler av konstruksjonen. Glasstak eller andre overlys elementer benyttes i hovedsak for å gi tilgang på dagslys og solvarme, redusere behovet for kunstig belysning, i tillegg til å ha et arkitektonisk formål.

Soltilskudd kan både være et positivt og negativt bidrag til bygningens energibruk gjennom året. I vinterhalvåret kan passiv solvarme fra solinnstråling benyttes som bidrag til oppvarming av bygget. I sommer, -vår og høstperioden kan solinnstråling føre til varme rom og økt kjølebehov. Vertikale sørfasader har størst solinnfall ved jevndøgn (vår og høst), mens vertikale øst- og vestfasader har størst solinnfall ved midtsommer [8]. Glasstak har tilsvarende øst- og vestfasader, størst solinnfall ved midtsommer. Da er solhøyden størst.

Det finnes ulike orienteringer av glassgårder; innelukkede, integrerte, lineære, omhylende og tilbygg. Ulike kombinasjoner av glassgårder, hentet fra byggdetaaljblad 527.231 “Glassgårder i store bygg. Temperatur- og energiforhold” [9], er vist i vedlegg A. Innelukket glassgård (også kalt glassoverdekket gårdsrom) er en av de mest vanlige løsningene og vist i figur 2.6. Denne typen glassgård eksisterer ved Ski og Strømmen storsenter. Orientering av glassfasaden har betydning for soltransmisjon (se likning 2.7 i neste delkapittel).



Figur 2.6: Innelukket glassgård [9].

Solstråling som kommer inn gjennom vinduselementer består av tre typer solstråler; direkte, diffus og reflektert. Direkte solstråling kommer gjennom vinduet direkte fra solen uten hindringer. Diffus solstråling varierer med skydekke. Reflektert solstråling blir reflektert i atmosfæren eller andre hindringer før det treffer vinduet. Solinnstråling har betydning for inneklima. Innstrålingen påvirker lufttemperatur og alle overflatetemperaturer i rommet, inkludert overflatetemperatur på personer som oppholder seg i rommet [9]. Personer som oppholder seg nærme glassfasaden vil i større grad bli påvirket av solinnstråling og overflatetemperatur på glasset [9].

TEK17 [1] inneholder ingen spesielle krav til glassgårder, men kravene for energibruk, dagslys og termisk inneklima har stor påvirkning for hvordan glassgårder skal utformes. Glassgårder og atrier er gjerne bygninger med store arealer og stor takhøyde. Dette vil ha stor påvirkning på luftstrømmer og termisk sjiktning i bygget [5]. I henhold til byggdetaljblad 527.231 *“Glassgårder i store bygg. Temperatur- og energiforhold”* må det tas stilling til følgende ved prosjektering av glasstak [9]:

Tabell 2.1: Viktige faktorer ved prosjektering av glassgårder.

Utforming av høyde, bredde, integrasjon og retningsorientering
Planlagt bruk som påvirker krav til inneklima og dagslys
Tilpasning til variasjon i året
Plassering av trapper og heiser
Brannventilasjon
Valg av ventilasjonsløsning
Plassering og utforming av inngangspartier for å unngå trekk
Valg av varmesystem for å unngå kaldras
Behov for lokal klimatisering ved for eksempel resepsjon og hvile- kantinearealer
Valg av glass og solskjerming
Valg av skillekonstruksjon mellom glassareal og tilliggende bygningskropp
Valg av materialkombinasjon som påvirker varmelagringsevnen

2.4.1 Solskjerming

Solskjerming benyttes for å regulere termisk komfort, dagslys og energibruk i bygget. Ved valg av solskjerming er det viktig å definere hvilken funksjon den skal ha. Egenskapene til ulike løsninger kan ofte være motstridende. Om sommeren er det vanlig å bruke solskjerming for å redusere kjølebehov og blanding. Dette kan gå på bekostning av dagslys og utsyn. Om vinteren kan solskjerming redusere varmetap, ved å benytte den som isolasjon utenfor driftstid. Solskjerming som isolasjon er et godt alternativ dersom

vindusskifte ikke er aktuelt eller ved verneverdige bygg. Forbedring av U-verdi ved bruk av solskjerming vil være størst ved dårlige vinduer [8].

Solskjermingsløsninger kan enten være regulerbare eller ikke-regulerbare. Ikke regulerbar solskjerming er innebygd i konstruksjonen og er derfor mer robuste og krever mindre vedlikehold. Regulerbar solskjerming har, i motsetning til ikke-regulerbar solskjerming, mulighet til å optimalisere fasaden ut fra mengde dagslys og solvarme. Solskjerming kan også deles inn i følgende typer ut fra plassering i fasaden [8]:

1. Utvendig solskjerming: Solskjerming ute, som gir best resultat dersom formålet er å kontrollere solvarme.
2. Mellomliggende solskjerming: Solskjerming plassert mellom vinduenes ruter.
3. Innvendig solskjerming: Solskjerming inne, som gir best resultat dersom formålet er å kontrollere dagslysnivå og blending.

Solstråler fra sola vil treffe glassfasaden og bli enten reflektert, absorbert eller transmittert. Reflektert solinnstråling blir reflektert når det treffer glassoverflaten og innvendig i bygget blir ikke påvirket. Absorbert solvarme vil øke overflatetemperaturen og deretter avgi varme ved konveksjon eller stråling fra flaten [8]. Direkte soltransmisjon (T_{dir}) er den solstrålingen som går direkte gjennom glasset og solskjerming uten å bli reflektert eller absorbert. Generelt gjelder følgende likning [8]:

$$\text{Innfallende stråling} = \text{refleksjon} + \text{absorpsjon} + \text{direkte soltransmisjon} \quad (2.6)$$

Direkte soltransmisjon beregnes ut fra forholdet mellom solinnstråling som kommer inn i rommet og den totale solinnstrålingen [8]. Se likning 2.7.

$$T_{dir} = \frac{Q_{dir}}{E_i} \quad (2.7)$$

Hvor:

T_{dir} =Direkte soltransmisjon [forholdstall]

Q_{dir} =Direkte soltransmisjon [W/m^2]

E_i =Innfallende stråling [W/m^2]

Total solenergitransmisjon (g-verdi) angir total mengde solenergi som transmitteres gjennom vinduet [8]. Verdien angis både for vindu alene og vindu+solskjerming (ikke for solskjerming alene). Denne faktoren bestemmer hvor mye energi som kommer inn gjennom vindu og derfor størst innflytelse på lufttemperaturen i rommet. G-verdien er summen av direkte solstråling og den absorberte solvarmen som blir avgitt fra flaten ved konveksjon eller stråling, som vist i likning 2.8 [8]. Overflatetemperaturen på glassfasaden bestemmes i hovedsak av direkte soltransmisjon (T_{dir}) og g-verdi [8].

$$g = \frac{Q_{dir} + Q_{ci} + Q_{ri}}{E_i} = T_{dir} + Q_{ci} + Q_{ri} \quad (2.8)$$

Hvor:

g =Total solenergitransmisjon [forholdstall]

Q_{dir} =Direkte soltransmisjon [W/m^2]

Q_{ci} =Konveksjon [W/m^2]

Q_{ri} =Stråling [W/m^2]

E_i =Innfallende solstråling [W/m^2]

2.4.2 Vinduslufting

Vinduslufting benyttes ofte om våren og sommeren for å redusere overoppheting i bygget, ofte som et supplement til øvrig ventilasjon [9]. Vinduslufting styres gjerne etter temperatur og/eller en driftsplan, hvor vinduene åpnes når innetemperaturen går over et satt setpunkt eller det er innenfor en bestemt driftsplan. Det er også vanlig å regulere vinduslufting etter en PI temperatur kontroll, hvor utetemperatur må være lavere enn innetemperatur for at vinduslufting skal aktiveres [10].

Åpning av vinduer øverst i bygget vil øke åpningsareal over nøytralplanet (A_2 i likning 2.4), som vil resultere i at nøytralplanet heves. Åpning av vinduer i glasstaket vil påvirke trykk- og luftstrømmer i bygget som beskrevet i kapittel 2.2, og er derfor ikke beskrevet videre under dette kapitlet. Hvordan vinduslufting påvirker trykkforholdet i bygget vil derfor være viktig ved valg av klimatiseringsløsning.

2.5 Termisk komfort

Parametere som påvirker termisk komfort er angitt i tabell 2.2 [11]. Forklaring av begrepene er gitt under.

Tabell 2.2: Parametere som påvirker termisk komfort for brukeren og i rommet.

Bruker	Aktivitetsnivå
	Bekledning
Rommet	Lufttemperatur
	Middelstråletemperatur
	Operativ temperatur
	Luftfuktighet

Lufttemperatur er, i henhold til byggedetaljblad 421.501 “Termisk inneklime, Betingelser, tilrettelegging og målinger” [11], det viktigste målet for termisk inneklime. I IDA ICE måles temperaturen 0,6m over gulvet, som svarer til personens tyngdepunkt når man sitter.

Middelstråletemperatur er et fiktiv mål for gjennomsnittlig temperatur på omgivende flater. Gjennomsnittlig strålingstemperatur beregnes som middelveiden av alle overflatetemperaturer i rommet, veid ut fra flatenes størrelse sett fra betrakningspunktet. Store forskjeller i overflatetemperatur på omgivende flater kan oppleves som ubehag. En varm himling er det som gir flest misfornøyde i vurdering av strålingsassymetri (forskjellen mellom plan strålingstemperatur på de motstående flatene) [11]. Temperaturprofil i høye atrier (fra figur 2.2) kan derfor skape stort misbehag. Denne temperaturprofilen gir rask økning av temperatur i øvre del, og kan skape stor forskjell mellom nedre og øvre temperatur.

Operativ temperatur er middelveidi mellom gjennomsnittlig strålingstemperatur og lufttemperatur. Forskjellen mellom lufttemperatur og operativ temperatur kan være stor ved eksponering mot kalde eller varme flater. Operativ temperatur kan beregnes etter likning 2.9 [11]. Likningen gjelder for lufthastigheter mindre enn 0,2 m/s eller når forskjellen mellom middelstrålingstemperaturen og lufttemperaturen er mindre enn 4 °C [11].

$$T_{op} = 0,5 \cdot (T_l + T_{fm}) \quad (2.9)$$

Hvor:

T_{op} =Operativ temperatur [°C]

T_l =Lufttemperatur [°C]

T_{fm} =Middelstråletemperatur [°C]

Lufthastighet påvirker termisk komfort i rommet, spesielt hvis man oppholder seg i nærheten av en tilluftsventil eller ved åpninger i klimaskjermen (vinduer, dører eller luftlekkasjer). Høy lufthastighet kan gi uønsket lokal kjøling og oppleves som trekk.

Luftfuktighet er et mål på for mye vanndamp som er i luften. Den vanligste måleenheten er relativ luftfuktighet, som er forholdet mellom vanndampmengden i luften og den maksimale vanndampmengden som luften kan inneholde. Høy relativ fuktighet kan øke svetteproduksjon og oppleves som ubehag. Lav relativ fuktighet kan gi tørre øyne. Variasjon mellom 40-60% oppleves som behagelig og har liten påvirkning for termisk komfort [11].

Kravene til inneklimate, som presentert under dette kapitlet og i kapittel 1.3, gjelder for en definert oppholdssone. Sonen går ikke helt inntil vegger og tak, men beregnes til et område som er 0,6m fra vegg og 1,8m over gulv [11].

3 Metode

For å undersøke oppgavens to problemstillinger er det anvendt måledata fra Airtight AS, utført egne feltmålinger og simuleringer i IDA ICE. Denne delen av oppgaven beskriver hvordan de tre metodene er utført.

3.1 Strømmen storsenter

Utfordringer knyttet til termisk komfort ved Ski og Strømmen storsenter var utgangspunktet for masteroppgaven. Grunnet tidsbegrensning i oppgaven og driftsstrategi ved Strømmen storsenter, er kun dette senteret benyttet som feltlab og modell i IDA ICE. Strømmen storsenter skrur av ventilasjon om natten. Det gir mulighet for å vurdere differansetrykket i bygget uten påvirkning fra mekanisk ventilasjon. Oppgavens resultater er likevel overførbart til Ski storsenter, da problemstillingene satt for oppgaven også er relevante for dette storsenteret.

Strømmen storsenter ligger på Strømmen i Skedsmo kommune, har et bruksareal på $167\,585\text{ m}^2$, oppvarmet areal på $69\,692\text{ m}^2$ og fellesareal på $30\,451\text{ m}^2$. Senteret inneholder omtrent 200 butikker og spisesteder. Senteret ble bygget i 1985 og har i senere tid blitt renovert og utvidet flere ganger. Senteret eies av Thon gruppen. Bygget har 3 etasjer med totalt 6 hovedinnganger i 1. etasje. Bygget har to glasstak på 210 og 68 m^2 . Det største glasstaket ligger over 3. etasje og det minste over 2. etasje. Ytterligere har senteret flere vertikale glassfasader fordelt på hele bygget, i tillegg til enkelte horisontale vinduer. Bygget har 45 ventilasjonsaggregater med en total luftmengde på ca. 800 000 l/s. Plantegning av senteret er vedlagt i vedlegg B.

3.2 Airtight målinger

Fra oktober 2018 er det utført trykkmålinger ved Ski og Strømmen storsenter. Målingene er utført av selskapet Airtight AS for å kartlegge trykbalansen i kjøpesenterene. Disse målingene er benyttet som måledata i oppgaven for å få oversikt over nåsituasjon og benyttet for modellering i IDA ICE. Målingene er utført ved utvalgte innganger i 1. og 3. etasje og plassert under tak ca 3m over bakken. Sensorerene logger hvert 10. minutt og måler følgende:

Inne: trykk [Pa], temperatur [$^{\circ}C$], luftfuktighet [% RH]

Ute: temperatur [$^{\circ}C$], luftfuktighet [% RH]

I tillegg er følgende værdata hentet fra Vær-API [12]: Nedbør [mm], Andel skyer [%], vindhastighet [m/s] og vindretning [grader].

Det er kun benyttet måledata for trykk og temperatur (inne og ute) i oppgaven, da disse er relevante for å undersøke trykkforholdene i bygget. Som nevnt er det i denne oppgaven kun benyttet måledata for Strømmen storsenter. Sensorene er plassert ved fem (av totalt seks) innganger i 1. etasje, i tillegg til en plassering i 3. etasje. Plassering av sensorene ved Strømmen storsenter er vist i vedlegg C.1. Dataene fra Airtight er bearbeidet i excel og matlab, hvor det er hentet ut måledata for utvalgte dager på høsten, vinteren og våren, i tillegg til hele måleperioden. Følgende datoer er hentet ut og presentert i oppgaven:

Tabell 3.1: Måledager hentet ut fra Airtight trykk- og temperaturmålinger.

Høst	18.10.2018
Vinter	23.11.2018 (black friday)
	15.01.2019
Vår	16.04.2019
	20.04.2019
Hele måleperioden	18.10.2018 - 26.04.2019

Målinger for 18. oktober (høst), 15. januar (vinter) og 16. april (vår) er benyttet for å kunne representere en typisk dag for den gitte årstiden. Målinger for 23. november (black friday) er benyttet for å se hvordan trykkforholdene er ved senteren på en dag med stor aktivitet, hvor dørene er omtrent fullt åpne gjennom hele dagen. Målinger for 20. april er hentet ut for å få en tilnærming til hvordan høy utetemperatur og mye solstråling påvirker trykk- og temperaturforhold i senteret. Målingene er ikke utført på sommeren, og gir derfor ikke mulighet til å vurdere reelle sommerforhold ved Strømmen storsenter. Alle de utvalgte dagene, bortsett fra lørdag 20. april, er hverdager.

Målingene fra Airtight er benyttet for å undersøke de reelle trykk- og temperaturforholdene ved Strømmen storsenter og benyttet som utgangspunkt ved modellering i IDA-ICE (se kapittel 3.4). Tilsvarende dager er simulert i IDA ICE. Trykk- og temperaturmålingene fra Airtight er presentert som resultat i kapittel 4.1.

3.3 Feltmålinger

Det er utført lufthastighet- og temperaturmålinger ved Strømmen storsenter onsdag 27.03.2019. Målingene er utført for å beregne lufthastighet og temperatur gjennom inngangspartiene og temperaturfordeling i høyden. I tillegg ble det utført manuelle målinger av areal på inngangspartier og etasjehøydene i bygget. Feltmålingene ble utført for å gjøre modellen i IDA ICE så realistisk som mulig.

Basert på trykkmålinger fra Airtight og etablert kunnskap om trykkforhold, ble det besluttet å gjøre målinger med og uten ventilasjon. Strømmen storsenter har 45 ventilasjonsaggregater hvor de fleste anleggene skrus på 09:45. Målingene ble utført med/uten ventilasjon (før og etter 09:45) og med lukket/åpen inngangsdør. Målingene ble utført på totalt seks innganger i 1. etasje. Temperaturfordeling i høyden ble målt i 1, 2 og 3. etasje, ved to tidspunkter på dagen (morgen kl 10:00 og ettermiddag kl. 15:30). Måleutstyret som ble benyttet var Swema 3000, lånt av OsloMet.

Grunnet stor usikkerhet i når de ulike anleggene skrus på ble målingene vurdert som ikke pålitelige. Det var ønskelig å måle lufthastighet ved inngangene uten påvirkning fra ventilasjon og ved helt lukkede dører. Dette var ikke gjennomførbart. Lufthastighet og temperatur i inngangen ble kun målt ved et punkt (1,5m innenfor dør og 0,8m over bakken), som gir stor usikkerhet i målingene. Feltmålinger av lufthastighet og temperatur ved Strømmen storsenter er presentert i vedlegg D (både målepunkter og resultat), men ikke benyttet videre i oppgaven.

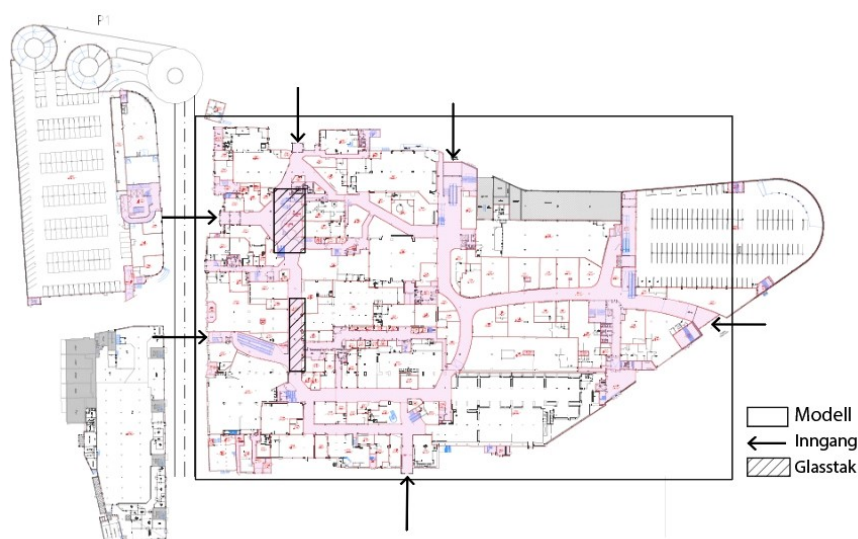
3.4 IDA-ICE modell

Det er utført simuleringer i IDA ICE (Indoor Climate and Energy) for å se hvordan åpningsareal og luftlekkasjer i klimaskjermen påvirker trykkforhold og termisk komfort i bygget (problemstilling 1) og hvordan ulike tiltak på glasstakene påvirker termisk komfort (problemstilling 2). Dette kapitlet beskriver hvordan modellen er bygget opp i IDA ICE. Simulering av tiltak er beskrevet i kapittel 3.5.

Programmet er et simuleringsverktøy i 3D, som benyttes for å vurdere inneklimate og energibruk i bygninger. Det er i denne oppgaven benyttet versjon 4.7 med lisensnøkkel fra OsloMet. Ved modellering i IDA ICE er det benyttet “avansert modell”, som gir mulighet for kunne undersøke flere variabler enn de som er tilgjengelig i “standard modell”. I denne modellen er komponenter beskrevet med likninger, variabler og parametere. Beskrivelsen av komponenter gjøres ved å bruke et språk som heter NMF (Neutral Mo-

dellformat). Forklaring av simuleringsspråket er beskrevet i vedlegg E.1. Ved beregning i IDA ICE benyttes enten “energimodell” eller “klimamodell”. Det er i denne oppgaven benyttet klimamodell, som gir mer detaljerte beregninger. Modellen er en algoritmisk modell som mottar signal fra klimafilen og gir signal til mottakere i fasade [10]. Beregningsdata i sonemodellen er vedlagt i vedlegg xx.

Det er modellert en forenklet modell av Strømmen storsenter, som illustrerer fellesarealene på senteret. Modellen består av tre etasjer, en inngangsdør i første etasje og to glasselementer på taket. Inngangsdøren representerer totalt seks innganger i første etasje ved Strømmen. Arealene til inngangene er summert opp og lagt inn som et inngangsparti i modellen. Figur 3.1 viser plantegning (1. etasje) av senteret med plassering av innganger og glasstak som er benyttet for å lage en modell.



Figur 3.1: Plantegning av Strømmen storsenter som benyttet for å lage modell i IDA ICE. Illustrasjonen viser plan 1. Modellen går over tre plan.

3.4.1 Inndata

Modellen er lagt inn med inndata som beskrevet i tabell 3.2. Inndata som benyttet i modellen er hentet fra Energinet [13] (energidata fra Strømmen storsenter), NS 3031:2014 [14], målt ved befaring eller estimert. Data som hentet fra Energinet eller målt ved befaring er sjekket opp mot NS 3031. Forretningsbygg er benyttet som bygningskategori. Det er benyttet default verdier (normalverdi) for internlaster fra personer, teknisk utstyr

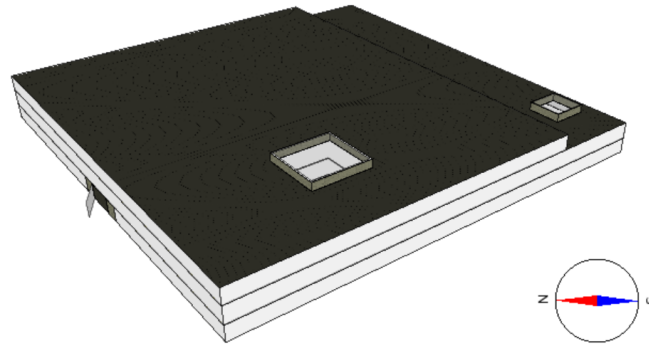
og belysning i IDA ICE.

Tabell 3.2: Verdier lagt til grunn for modellering i IDA ICE.

Parameter	Verdi	Hentet fra
BRA fellesareal [m ²]	30 450	Energinet
BRA 1. etasje [m ²]	10 874	Estimert
BRA 2. etasje [m ²]	10 874	Estimert
BRA 3. etasje (20% av 2. etasje) [m ²]	8 700	Estimert
Høyde 1 etasje [m]	3,6	Målt
Høyde 2. etasje [m]	4	Målt
Høyde 3. etasje [m]	3,7	Målt
Areal inngangspartier 1 etg (6stk) [m ²]	27	Målt
Lekkasjeareal inngangspartier [m ²]	0,15037	Estimert
Areal glasstak 1 [m ²]	210	Målt
Areal glasstak 2 [m ²]	68	Målt
U-verdi gulv mot grunn [W/m ² K]	0,5	NS 3031 tabell B.1
U-verdi vegger [W/m ² K]	1,0	NS 3031 tabell B.1
U-verdi tak [W/m ² K]	1,0	NS 3031 tabell B.1
U-verdi vindu [W/m ² K]	2,8	NS 3031 tabell B.2
Lekkasjetall [1/h]	1,5	NS 3031 tabell B.4
Kuldebroer [W/m ² K]	0,13	NS 3031 tabell B.3
Ventilasjonsprinsipp	CAV	Energinet
Gjenvinningsgrad [%]	70	Energinet
SFP [kW/m ³ s]	2,5	NS 3031 tabell B.7
Driftstid	12/6/52	Drift
Luftmengde [l/s m ²]	8	Energinet
Tilluftstemperatur [°C]	22	Energinet
Oppvarming per etasje [kW]	270	Estimert ut fra Energinet
Setpunkt oppvarming [°C]	21/25	Default IDA ICE
Oppvarmingsprinsipp	100% konvektiv	

Soneinndeling: Modellen består av tre plan, som er inndelt i hver sin sone. Det er åpning mellom etasjene/sonene. Ved å inndele bygget i soner for hver etasje, kan man vurdere termisk komfort for hver enkelt etasje. Dette for å undersøke påvirkning av termisk sjiktning i bygget. Modellen er ikke lagt inn med glasselementer i fasaden. Det er lagt vekt på hvordan solstråling gjennom glasstakene påvirker termisk komfort i bygget. Ved Strømmen storsenter er det to glasstak, som har et areal på 210 m² og 68 m². Videre henvist som henholdsvis glasstak 1 og 2. Glasstak 1 ligger over 3. etasje og glasstak 2 ligger over 2. etasje. Glasstakene er laget som en egen sone med et vindus-element som dekker hele taket av glasstaksonen. Det er åpning mellom øverste etasje og

glasselementene. Modellen som modellert i IDA ICE er vist i figur 3.2.



Figur 3.2: Modell i IDA ICE. Viser plassering av glasstakene og inngangspartiet, i tillegg til orientering av bygget. Glasstak nr 1 til venstre og glasstak nr 2 til høyre.

Grensebetingelser: Modellen illustrerer fellesarealet som grenser mot butikkarealene. Modellen er derfor lagt inn som sone mot oppvarmet areal (butikkene), med en overflate-temperatur på andre siden av veggen på 22°C . Inngangspartiet og et areal på 27m^2 rundt inngangspartiet vender ut mot fasaden. Taket i 2. og 3. etasje og glasstakene vender ut mot fasaden.

Ventilasjonsanlegget: Strømmen storsenter har totalt 45 ventilasjonsaggregater som distribuerer luft i ulike områder av bygget. Det er CAV (konstans luftmengde) ventilasjon med tilluft i butikkene og sentralt avtrekk i fellesarealene. Det er tilluft og avtrekk i alle etasjer. Det er åpent mellom etasjene og fra fellesarealet og inn til butikkene. Alle aggregatene ved Strømmen storsenter har ulike setpunkt for temperatur, luftmengde, gjenvinningsgrad og driftstid. Ved modellering i IDA ICE er det derfor benyttet gjennomsnittsverdier. Ventilasjonsanlegget ved Strømmen storsenter har en gjennomsnittlig tilluftstemperatur på 17°C . Det er antatt en temperatur i butikkarealene på 22°C . Viften i ventilasjonsanlegget i IDA ICE har et temperaturløft på 1°C . Det er derfor lagt inn et setpunkt på tilluftstemperatur på 21°C i modellen.

Klimadata: Klimadata er hentet fra eKlima [15] fra Meteorologisk institutt, for å få tilsvarende klimadata som ved Airtight målinger. Data er hentet fra 01.04.2018-01.04.2019 og 02.04.2019-31.03.2019 og lagt inn for hele 2019 i IDA ICE. Diffus og direkte solstråling er ikke tilgjengelig fra eKlima. Det er derfor benyttet soldata fra IDA ICE. Følgende parametere er hentet fra eKlima: utetemperatur [$^{\circ}\text{C}$], relativ fuktighet [%], vindretning [Deg] og vindhastighet [m/s]. Klimadata rapport benyttet i simulering i IDA ICE er

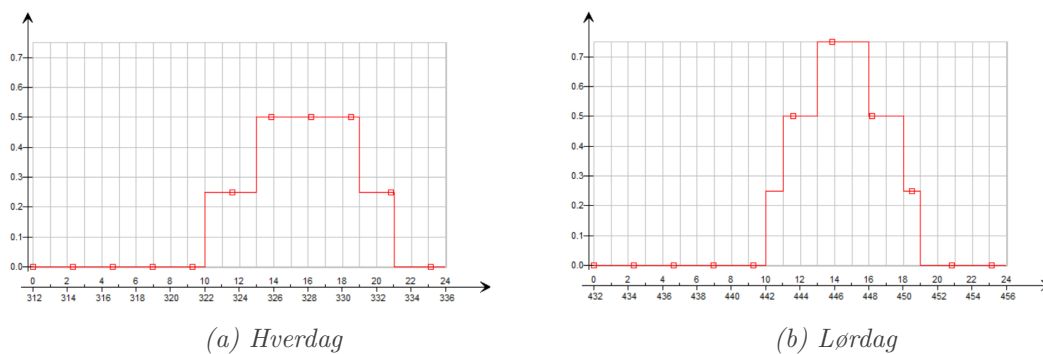
vedlagt i vedlegg E.3.

3.4.2 Åpninger i klimaskjermen

Åpninger i klimaskjermen påvirker trykkforholdene i bygget som beskrevet i metoden. Det er derfor lagt inn åpninger i modellen som gir tilsvarende trykkforhold som ved Airtight trykkmålinger. Hvordan åpningsgrad på døren og luftlekkasjer i bygget er modellert i IDA ICE er beskrevet under denne seksjonen.

Åpningsgrad dør

Åpningsgrad på døren er bestemt ut fra driftstid ved Strømmen storsenter og et estimat på hvor mye døren er åpen gjennom døgnet (0=lukket, 1=helt åpen). Åpningsgraden på en hverdag og lørdag er vist i figur 3.3a og 3.3b.



Figur 3.3: Åpningsgrad for inngangsdøren i 1 etasje.

Luftlekkasjer

Trykkforholdet i modellen er justert ved å teste for ulike lekkasjer i sonene, inngangspartiet og glasstakene.

Luftlekkasjer i sonene (1, 2 og 3. etasje) er estimert til å være $0,1 m^2$. Det er benyttet en lekkasjekoeffisient (IDA ICE: Cd factor in flow) på 0,65 gjennom alle åpninger i bygget (default verdi).

Luftlekkasjer gjennom inngangspartiet er beregnet ut fra omkrets rundt totalt seks innganger i første etasje og med en lekkasje på 2mm over hele omkretsen. Alle inngangspartiene i første etasje er skyvedører. Lekkasje mellom skyvedørene er også medregnet.

For å finne eventuelle lekkasjeareal i glasstakene er det utført enkel iterasjon i IDA ICE. Det er testet for ulik fordeling av lekkasjer i glasstak 1 og 2, for å få tilsvarende trykk i bygget som Airtight målinger. Modellen er sammenlignet med Airtight uten påvirkning

fra ventilasjon (utenfor driftstid), hvor det er antatt at alle innganger i bygget er lukket. Sammenligningen av trykkforhold er utført for tilsvarende dager som vist i tabell 3.1 i kapittel 3.2. På dette tidspunktet var ikke måledata for senere periode tilgjengelig. Sammenligning for sommerperioden er derfor ikke mulig. Resultat fra modellering av luftlekkasjer i klimaskjermen er presentert som resultat i kapittel 4.2.1.

3.5 Simulering av tiltak

Utvalgte tiltak er simulert i IDA ICE for å se hvordan disse påvirker trykkforhold, temperatur (lufttemperatur og operativ temperatur) og luftstrømmer gjennom åpninger i klimaskjermen. Følgende tiltak er simulert i IDA ICE:

1. Tetting av tak
2. Solskjerming på glasstaket
3. Vinduslufting av glasstaket

Hver simulering/tiltak er kontrollert opp mot grunnlagsmodellen som beskrevet i kapittel 3.4. Trykkforhold i etasjene i modellen måles 3m over bakken. Dette er tilsvarende plassering som ved Airtight sensorer. Operativ temperatur måles ved en person som er plassert i hver sone. I 1-3 etasje er personen plassert under glasstak 1. I glasstaksonene er personen plassert midt i sonen. Det er også simulert operativ temperatur for en person under glasstak 2 i 2. etasje (opprinnelig plassert under glasstak 1), for å vurdere hvordan temperature blir på virket av glasstakene. Tiltakene er testet for et utvalgt døgn på vinteren (15. januar), våren (16. april) og sommeren (15. juli). Hvordan simuleringene for hvert tiltak er utført er beskrevet i henholdsvis kapittel 3.5.1, 3.5.2 og 3.5.3.

3.5.1 Tetting av tak

Tetting av glasstak er simulert ved å fjerne lekkasjene som lagt inn i begge glasstakene i grunnlagsmodellen, samt forbedre U-verdien. Lekkasjeareal som lagt inn i grunnlagsmodellen basert på iterasjonsmetoden er presentert i resultatet (kap. 4.2.1). U-verdien i glasstakene (vindu og ramme) er endret fra $2,86 W/m^2K$ til $1,13 W/m^2K$ (Minstekrav i TEK17 er $1,2 W/m^2K$). Lekkasjer i inngangsdør og etasjene er ikke endret og tilsvarende som beskrevet i kapittel 3.4.2. Det er valgt å endre U-verdi samtidig som å tette luftlekkasjene, da dette ville vært gjennomført slik i praksis.

3.5.2 Solskjerming

Solskjerming kan styres forskjellig ut fra behov. Det er i denne oppgaven fokusert på å bruke solskjerming for å redusere varmetilskudd fra sola og for å unngå overtemperatur øverst i bygget. Det er derfor kun testet for hvilken effekt solskjerming har på våren (16. april) og sommeren (15. juli). Det er testet for følgende solskjermingsløsninger:

1. Utvendig skjerm (IDA ICE: exterior screen)
2. Innvendig rullegardin (IDA ICE: interior roller shade)
3. Microshade (IDA ICE: Micro lamella)

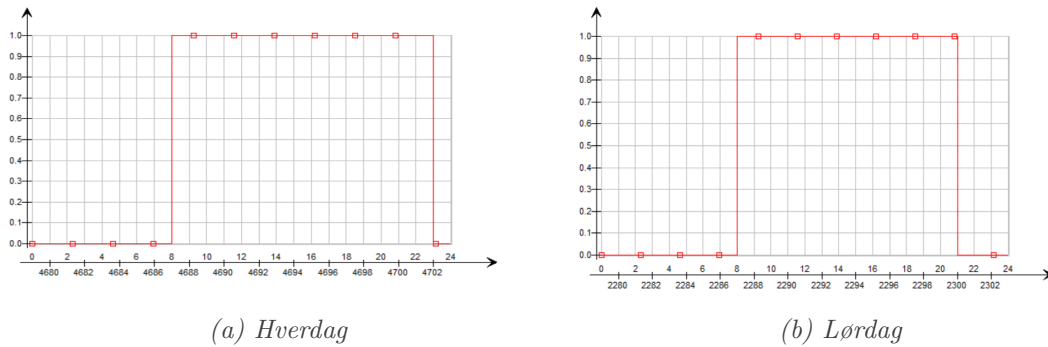
Solskjermingsløsning 1 og 2 kan reguleres og er styrt etter soltilskudd gjennom hele året. Dette er en enkel og vanlig løsning som benyttes for å redusere passiv solvarme, med størst effekt om sommeren. Solskjermingen aktiveres når solinnstråling overstiger setpunkt på 100 W/m^2 . Målepunktet er på utsiden av vinduet og måles når solskjerming ikke er aktivert. Solskjermingsløsning 3 er en fast solskjerming og kan ikke reguleres. Egenskaper på glass og solskjerming, som simulert med i IDA ICE er vist i tabell 3.3.

Tabell 3.3: Glass og solskjerming egenskaper i henhold til ISO 15099 [16], hentet ut fra IDA ICE.

	Uten solskjerming	Utvendig	Innvendig	Microshade
G-verdi	0,712	0,098	0,418	0,513
Soltransmisjon	0,597	0,026	0,033	0,368
Lystransmisjon	0,786	0,037	0,045	0,485
U-verdi [W/m^2]	2,859	2,037	2,258	2,638
Diffusjonsfaktor	0	1	1	0,014

3.5.3 Vinduslufting

Vinduslufting på begge glasstakene er simulert i IDA ICE. Vinduslufting er benyttet for å redusere overoppheting i øvre del av bygget, og simulert for vår (16. april) og sommer (15. juli). Det er testet for ulike styringsstrategier for vinduslufting. Strategiene som er testet er: alltid åpen, PI temperatur, PI temperatur og driftsplan og kun driftsplan. For å kunne vurdere lufting både for vår/sommer og i/utenfor driftstid er det valgt å simulere for vinduslufting etter en driftsplan. Denne aktiverer vinduslufting 2t før åpningstid og deaktiveres 2t etter åpningstid, fra april-september. Styringsplanen er vist i figur 3.4.



Figur 3.4: Aktivering av vinduslufting på en hverdag og lørdag i IDA ICE.

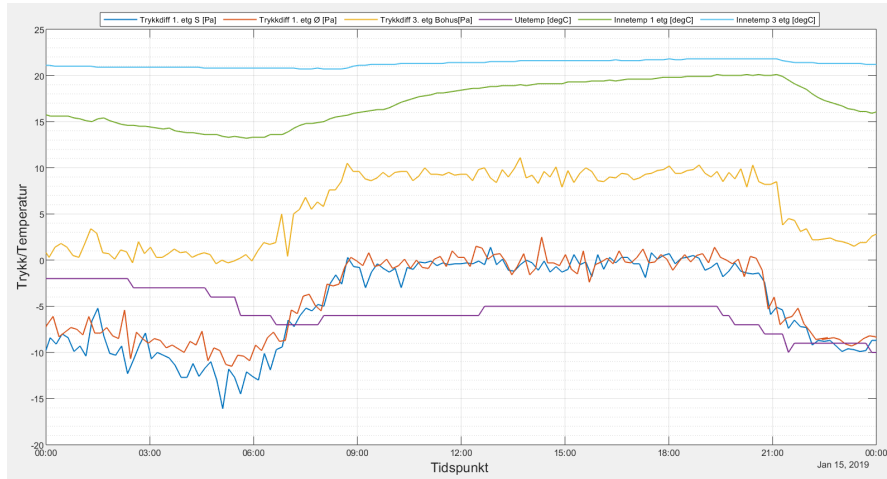
4 Resultat

I dette kapitlet presenteres resultater fra Airtight målingene som beskrevet i kapittel 3.2 og simulering i IDA ICE som beskrevet i kapittel 3.4 og 3.5. Fra Airtight målinger er det presentert trykk- og temperaturmålinger for å kartlegge nåsituasjon ved Strømmen storsenter. Fra IDA ICE er det presentert resultatet fra modellering av grunnlagsmodell og simulering av følgende tiltak: tetting av tak, solskjerming og vinduslufting. Resultatene blir diskutert i kapittel 5.

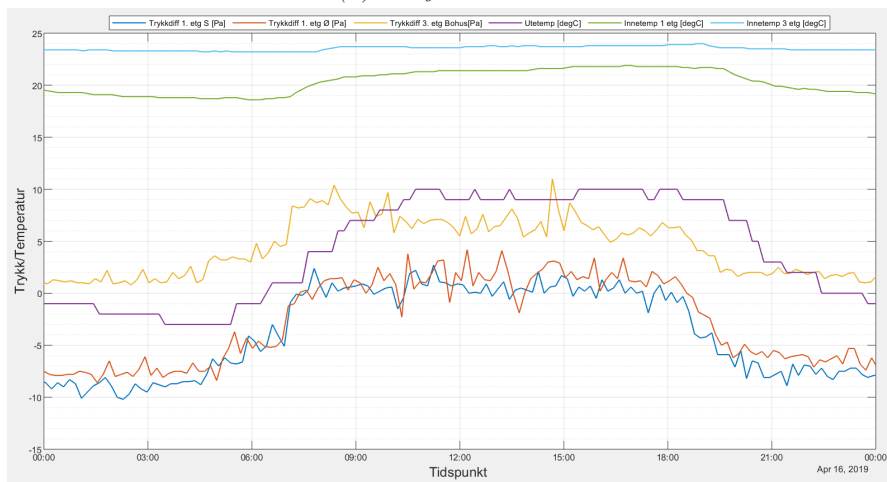
4.1 Airtight målinger

Figur 4.1 (neste side) viser trykk- og temperatur målinger ved Strømmen storsenter for tre utvalgte dager. Hvorfor disse dagene er valgt ble beskrevet i metodekapitlet. Grafene viser differansetrykket mellom inne og ute ved tre målepunkter (to i 1.etasje og en i 3. etasje), utetemperatur og innnetemperatur i 1. og 3. etasje. Måleresultat for 18. oktober (høst) og 23. november (black friday), i tillegg til hele måleperioden (18. oktober 2018 - 26. april 2019) er presentert i vedlegg C.2.

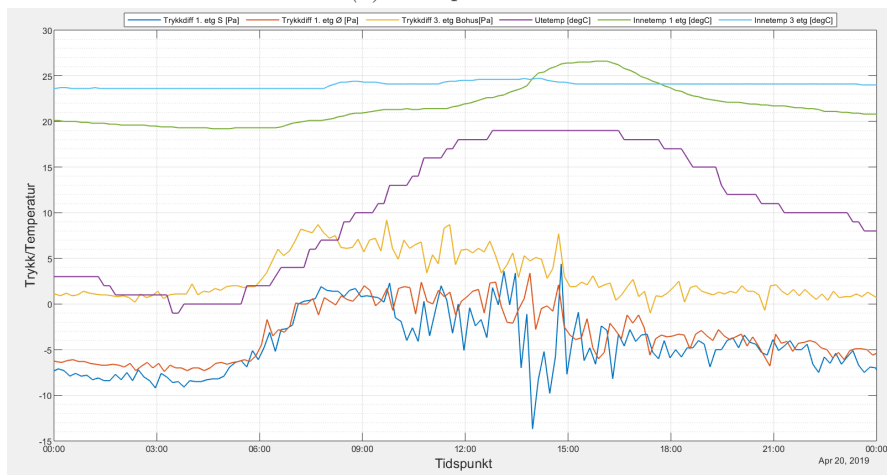
Målepunktene for trykk presentert i resultatet viser tre av totalt seks målepunkter ved Strømmen. Tre målinger er utelukket i vurdering av trykkforhold fordi de ikke viser trykkendring eller tyder på avvikende trykkforhold i perioder. Disse målepunktene er derfor ikke benyttet i oppgaven.



(a) 15. januar 2019



(b) 16. april 2019



(c) 20. april 2019

Figur 4.1: Trykk- og temperaturmålinger fra Airtight. Mørk blå: trykk 1.etgS. Rød: trykk 1.etgØ Rosa: trykk 1.etgØ. Gul: trykk 3.etg. Bohus. Lilla: utetemp. Grønn: unnetemp. 1.etg. Lys blå: unnetemp. 3.etg.

4.2 IDA ICE modell

I det kommende avsnittet presenteres resultat fra modellering av grunnlagsmodell i IDA ICE, som beskrevet i kapittel 3.4. Modellen er modellert så realistisk som mulig og benyttet i oppgaven for å beskrive trykkforholdene i bygget og hvordan det påvirker termisk komfort.

Kapittel 4.2.1 presenterer lekkasjearealene som estimert i modellen basert på iterasjonsmetoden. Kapittel 4.2.2, 4.2.3 og 4.2.4 presenterer henholdsvis trykkforhold, temperaturforhold og luftstrømmer, hentet direkte ut fra IDA ICE. Resultatet viser et utvalgt vinterdøgn (15. januar), vårjevndøgn (16. april) og sommerdøgn (15 juli). De utvalgte dagene er hverdager og derfor simulert med åpningsgrad på døren som beskrevet i figur 3.3a i metodekapittel 3.4.2. Simulering for hele 2019 er presentert i vedlegg E.4-5. AHU temperatur (tilluft, avtrekk og utetemperatur) i modellen og soltilskudd gjennom glasstakene for de tre utvalgte dagene er presentert i henholdsvis vedlegg E.7 og E.8.

4.2.1 Lekkasjeareal

Tabell 4.1 viser lekkasjearealene som modellert i IDA ICE, for å få tilsvarende trykkforhold som ved Strømmen storsenter. Lekkasjearealet i glasstak 1 ($210m^2$) utgjør 1,2% av glassarealet. Lekkasjearealene i glasstak 2 ($68m^2$) utgjør 1,5% av glassarealet. Forholdet mellom lekkasjeareal og glassareal er tilnærmet likt for begge glasstakene, da det er antatt at andel lekkasjeareal i begge glasstakene er det samme. Simulering med de gitte lekkasjearealene gir et nøytralplan som ligger i 3. etasje, tilsvarende resultat fra Airtight (som presentert i figur 4.1).

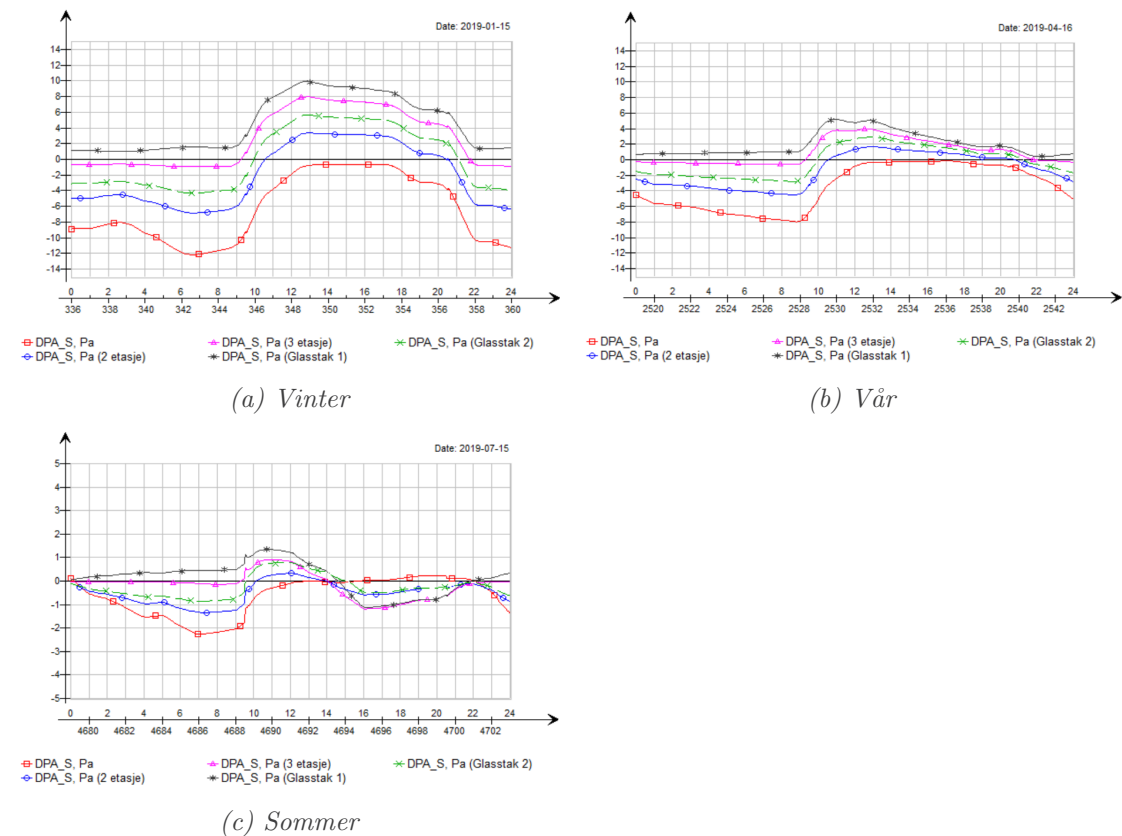
Tabell 4.1: Lekkasjeareal i IDA ICE modellen. Basert på iterasjonsmetoden for å få tilsvarende trykkforhold som utført av airtight ved Strømmen storsenter.

Område	Lekkasje [m^2]
1. etasje	0,1
2. etasje	0,1
3. etasje	0,1
Glasstak 1	2,5
Glasstak 2	1
Dør i 1. etasje	0,15037

4.2.2 Trykkforhold

Figur 4.2 presenterer trykkdifferansen mellom inne og ute i 1-3 etasje og glasstak 1 og 2, for de tre utvalgte dagene. Trykkforhold for hele året er presentert i vedlegg E.4.

Trykkforholdet for vinterdøgnet (figur 4.2a) viser tilsvarende trykkforhold som ved airtight (vist i figur 4.1a). Før åpningstid ligger nøytralplanet i 3. etasje, for så å senkes til 1. etasje under åpningstiden. Trykkdifferansen vertikalt i bygget er omtrent 10 Pa. Trykkforholdet for vårdøgn viser lik trykkprofil som på vinteren, men med mindre trykkforskjeller vertikalt i bygget (ca. 5 Pa). Trykkforholdet om sommeren viser tilsvarende trykkprofil som for vinter og vår frem til rundt kl 14:00. Etter dette tidspunktet er det overtrykk nederst i bygget og undertrykk øverst i bygget (motsatt av vinter- og vårdøgn). I tillegg er det vesentlig lavere trykkforskjell enn for vinter og vår.



Figur 4.2: Trykkforhold [Pa] i 1-3 etasje og glasstak 1 og 2, 15. januar, 16. april og 15. juli 2019. Rød: 1.etasje. Blå: 2. etasje. Rosa: 3. etasje. Svart: glasstak 1. Grønn: glasstak 2.

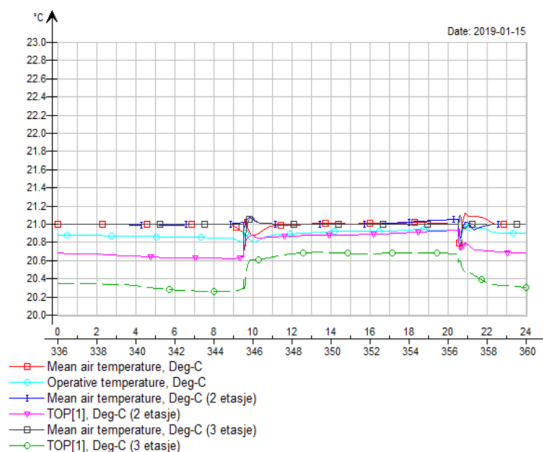
4.2.3 Temperaturforhold

Figur 4.3 viser operativ temperatur og lufttemperatur i 1-3 etasje og glasstak 1 og 2 for de tre utvalgte dagene. Temperaturforhold for hele året er presentert i vedlegg E.5. Rekkevidden på grafene (y-aksen) er justert for å kunne visualisere forskjellene mellom temperatur i de ulike sonene, og derfor ikke lik for alle dagene.

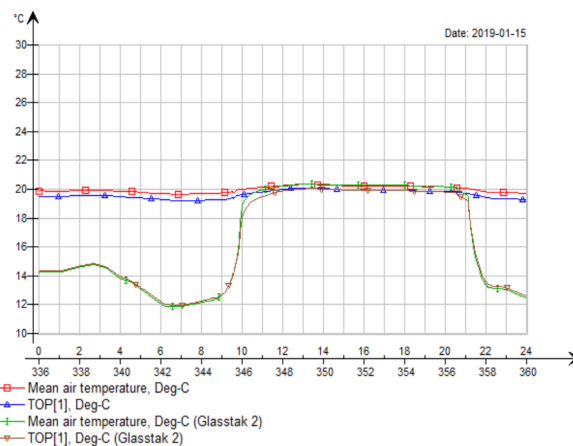
Figur 4.3a og 4.3b viser temperaturforhold i etasjene og glasstakene 15. januar. Lufttemperaturen i 1-3 etasje er lik gjennom hele døgnet, mens operativ temperatur varierer vertikalt i bygget i og utenfor åpningstid. Resultatene viser kaldere operativ temperaur øverst i bygget. Operativ temperatur er lik lufttemperatur i glasstakene gjennom hele døgnet. Utenfor åpningstid er det 5-8 °C kaldere i glasstak 2 enn glasstak 1. Laveste temperatur i glasstak 2 er 12 °C. I åpningstiden er det lik temperatur i de to glasstakene, med en temperatur på 20 °C.

Figur 4.3c og 4.3d viser temperaturforhold i etasjene og glasstakene 16. april. Om våren er det liten variasjon i temperatur mellom etasjene. Operativ temperatur i 3. etasje varierer mest gjennom døgnet, fra 20,6 °C utenfor åpningstid til 21,6 °C i åpningstiden. I glasstak 1 er det 20 °C utenfor åpningstid og opp mot 24 °C i åpningstiden. I glasstak 2 er det ned mot 16 °C utenfor åpningstid og opp mot 25 °C i åpningstiden.

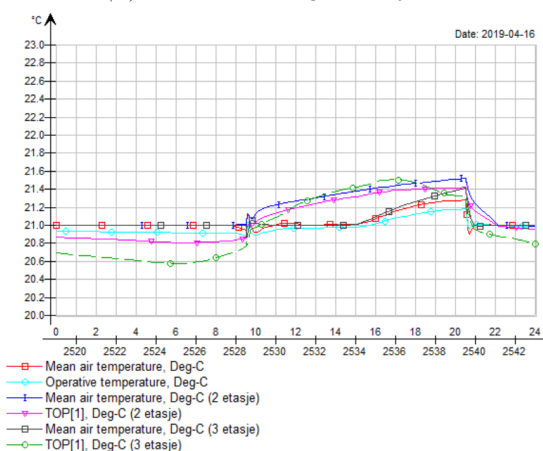
Figur 4.3e og 4.3f viser temperaturforhold i etasjene og glasstakene 15. juli. Utenfor åpningstid er lufttemperaturen lik operativ temperatur for hver etasje. Temperaturforskjellen mellom 1. og 3. etasje er 3 °C (23-26 °C). I åpningstiden er operativ temperatur i 3. etasje opp mot 25 °C og lufttemperaturen redusert til 23 °C. I glasstak 1 og 2 kan det bli opp mot 35 og 40 °C. Temperaturen i glasstakene varierer med 10-15 °C gjennom døgnet.



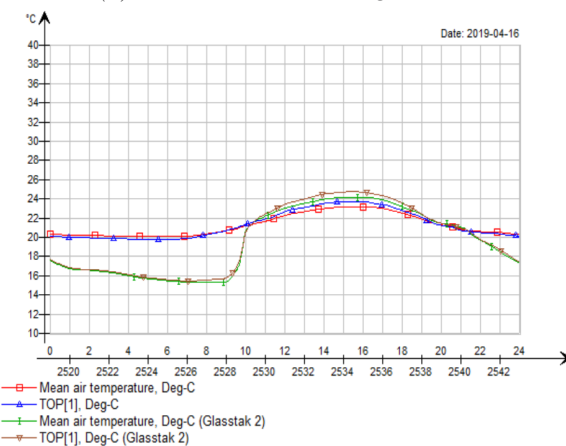
(a) Vinter: 1, 2 og 3 etasje



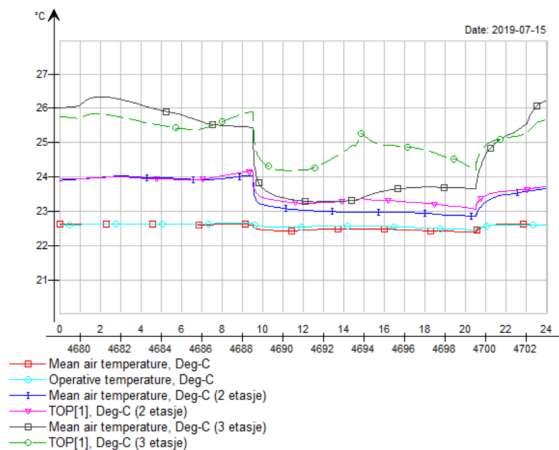
(b) Vinter: Glasstak 1 og 2



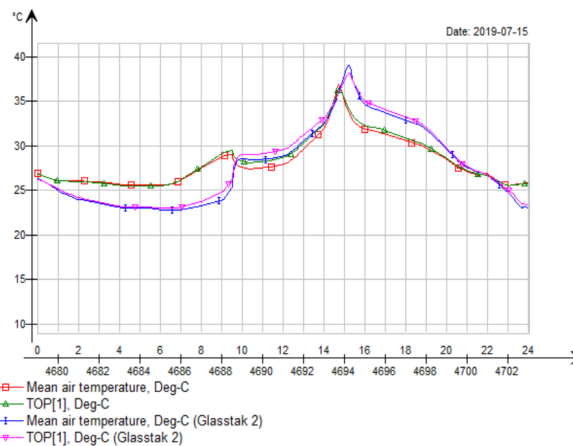
(c) Vår: 1, 2 og 3 etasje



(d) Vår: Glasstak 1 og 2



(e) Sommer: 1, 2 og 3 etasje



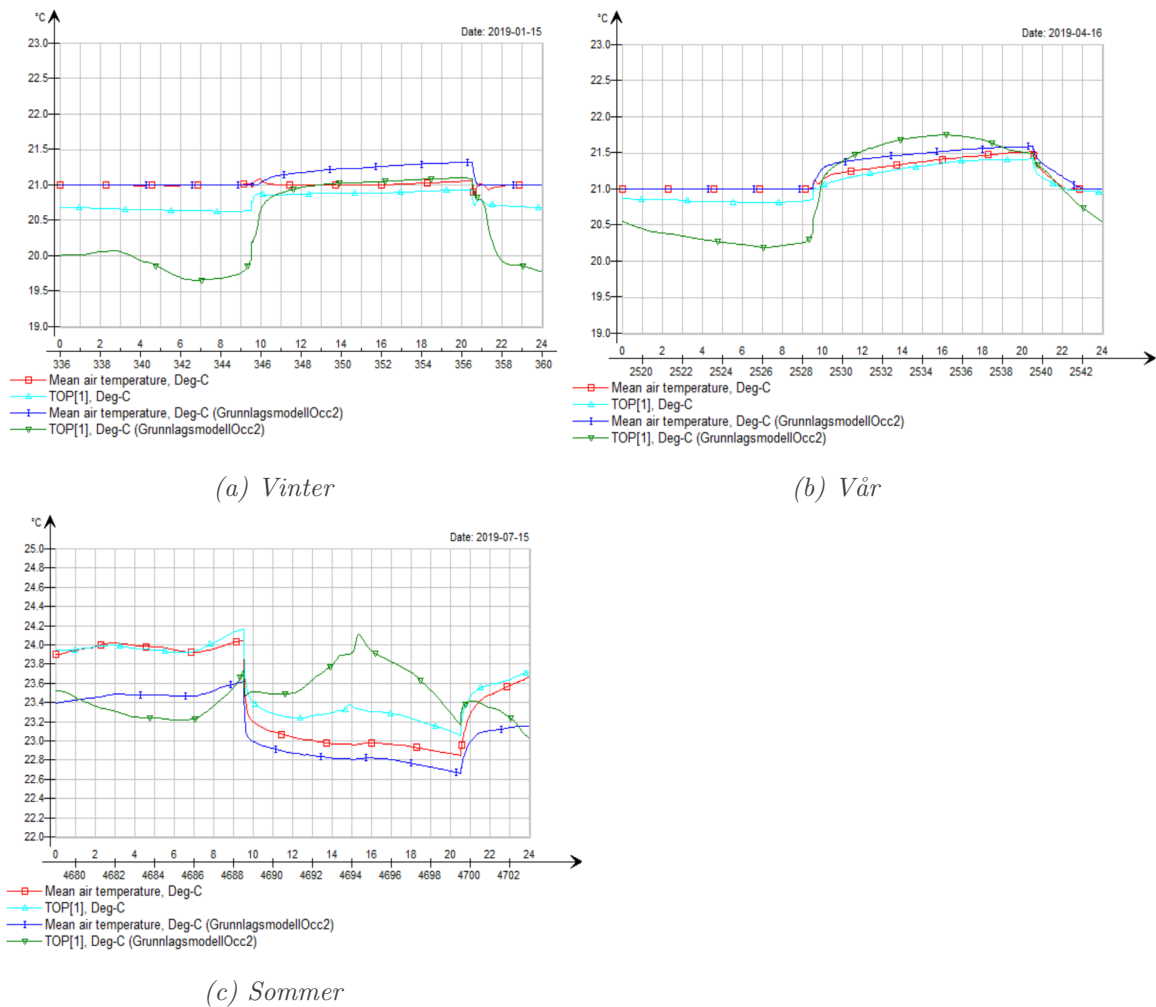
(f) Sommer: Glasstak 1 og 2

Figur 4.3: Operativ temperatur og lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$] i 1-3 etasje (venstre kolonne) og glasstak 1 og 2 (høyre kolonne) for vinter (15. januar), vår (16. april) og sommer (15. juli) 2019. Etasjer: Rød: Lufttemp. 1. etasje. Turkis: Op.temp. 1. etasje. Blå: Lufttemp. 2. etasje. Rosa: Op.temp. 2. etasje. Svart: Lufttemp. 3. etasje. Grønn: Op.temp. 3. etasje. Glasstak: Rød: Lufttemp. glasstak 1. Grønn: Op.temp. glasstak 1. Blå: Lufttemp. glasstak 2. Rosa: Op.temp. glasstak 2.

Temperatur i 2. etasje ved ulik plassering av person i sonen

Figur 4.4 viser operativ temperatur og lufttemperatur i 2. etasje for de utvalgte dagene, hvor det er presentert forskjellen for en person som er plassert under glasstak 1 og 2. Plassering av person i de andre sonene er ikke endret.

Resultatene viser hvordan plassering nærme glasstak 2 vil gi lave temperatur utenfor åpningstid om vinteren og våren og økt temperatur om sommeren.

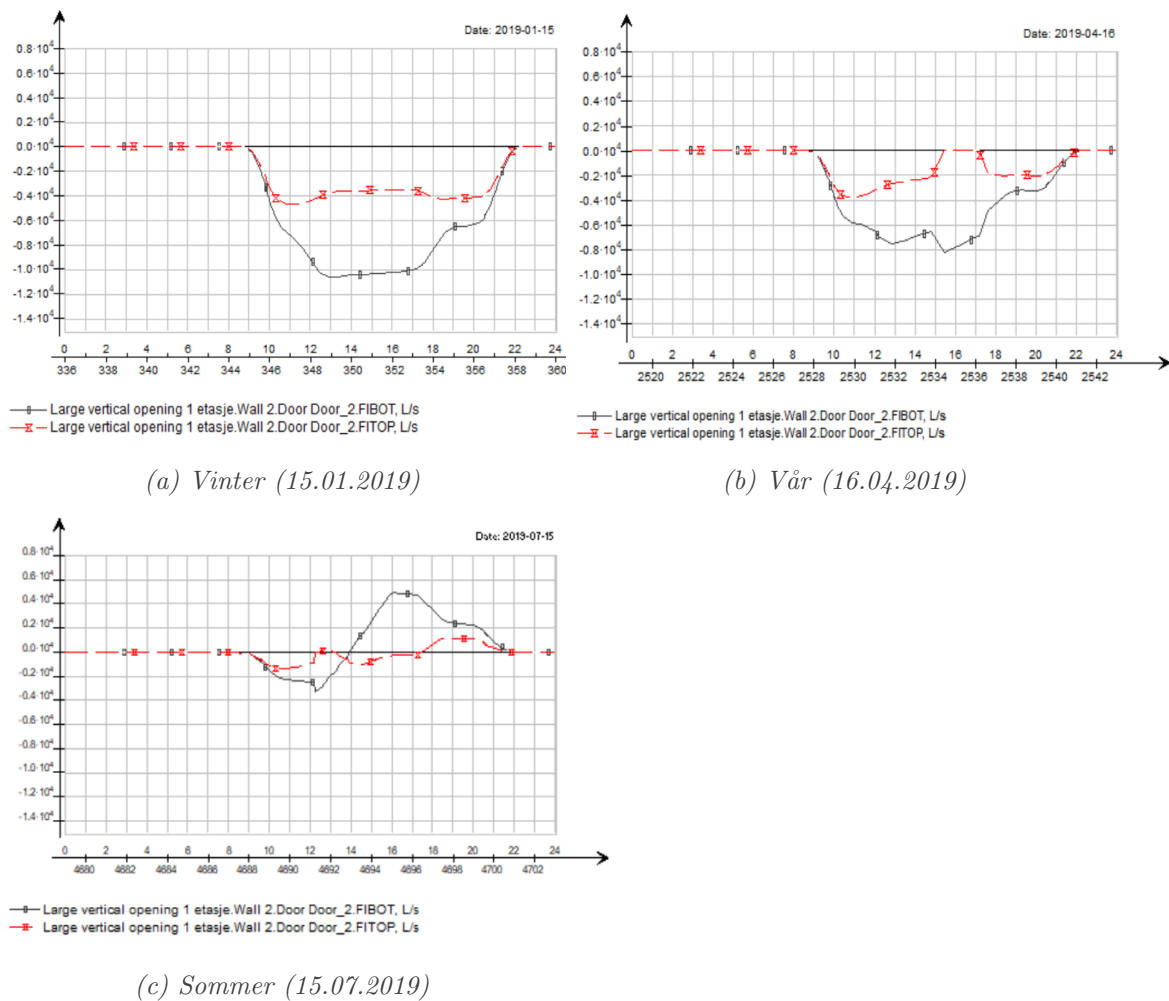


Figur 4.4: Operativ temperatur og lufttemperatur i 2. etasje for 15. januar, 16. april og 15. juli, ved ulik plassering av person. Rød: Lufttemperatur under glasstak 1. Turkis: Operativ temperaur under glasstak 1. Blå: lufttemperatur under glasstak 2. Grønn: Operativ tempertur under glasstak 2.

4.2.4 Luftstrømmer gjennom åpninger i klimaskjermen

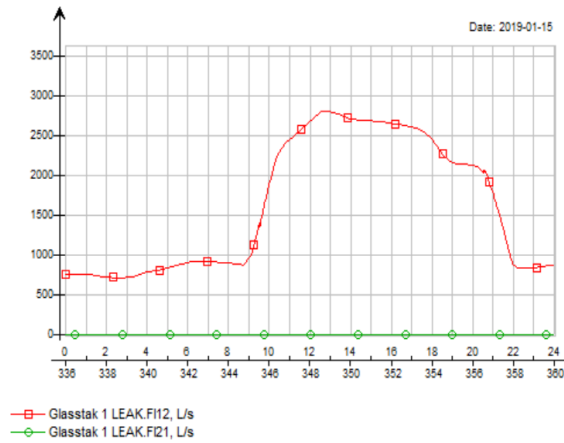
Figur 4.5 og 4.6 presenterer luftstrøm gjennom inngangsdør i 1. etasje og lekkasjene i glasstak 1 og 2. Luftstrømmer for hele året er presentert i vedlegg E.6.

Figur 4.5 viser luftstrøm som går ut (positiv verdi) eller inn (negativ verdi), målt øverst og nederst i døren. Gjennom vinterdøgnet vil luften gå inn gjennom døren gjennom hele åpningstiden. Gjennom vårdøgnet vil det gå mindre luft inn gjennom døren, og midt på dagen (rundt kl. 16:00) kun inn nederst i døren. Gjennom sommerdøgnet vil luften gå inn gjennom døren før kl. 14:00 og ut gjennom døren etter kl. 14:00, og med lavere luftmengder enn vinteren og våren.

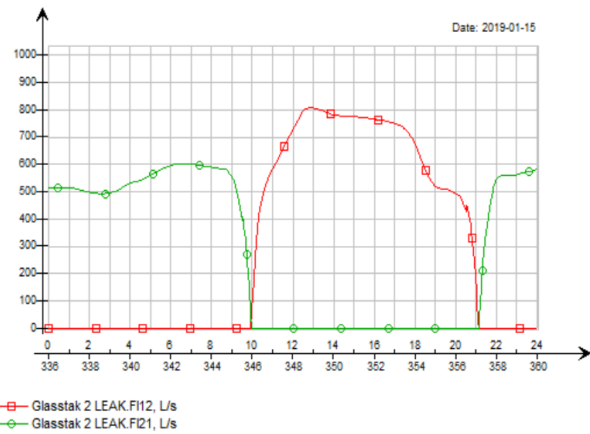


Figur 4.5: Luftstrøm [l/s] gjennom inngangsdør i 1. etasje for utvalgte dager. Rød: toppen av døren. Svart: bunnden av døren.

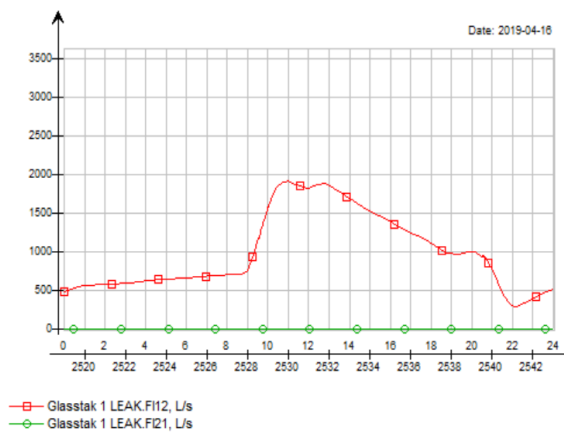
Figur 4.6 (neste side) viser luftstrøm som går ut (rød) eller inn (grønn) av lekkasjene i glasstakene. Gjennom vinterdøgnet vil luften gå ut gjennom glasstak 1 gjennom hele døgnet. I glasstak 2 vil luften gå inn gjennom lekkasjene utenfor åpningstid og ut i åpningstiden. Gjennom vårdøgnet er det tilsvarende situasjon som på vinteren, men med lavere luftmengder ut og inn av lekkasjene i glasstakene. Gjennom sommerdøgnet er det mindre luftmengder som går inn og ut av lekkasjene i glasstakene, hvor luften beveger seg ut/inn av lekkasjene basert på når det er overtrykk/undertrykk i sonen.



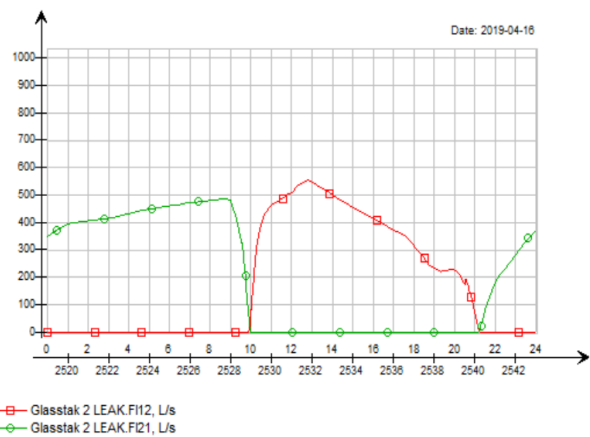
(a) Vinter: Glasstak 1



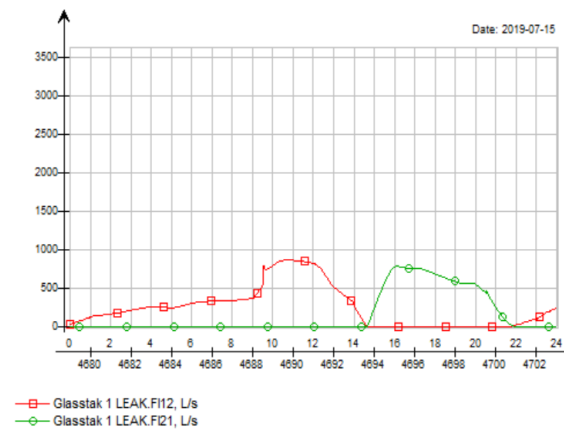
(b) Vinter: Glasstak 2



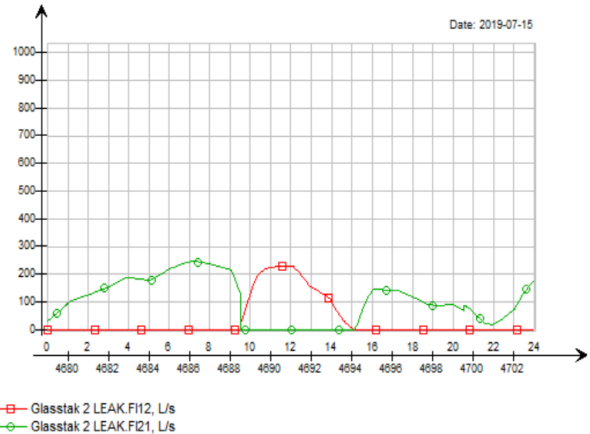
(c) Vår: Glasstak 1



(d) Vår: Glasstak 2



(e) Sommer: Glasstak 1



(f) Sommer: Glasstak 2

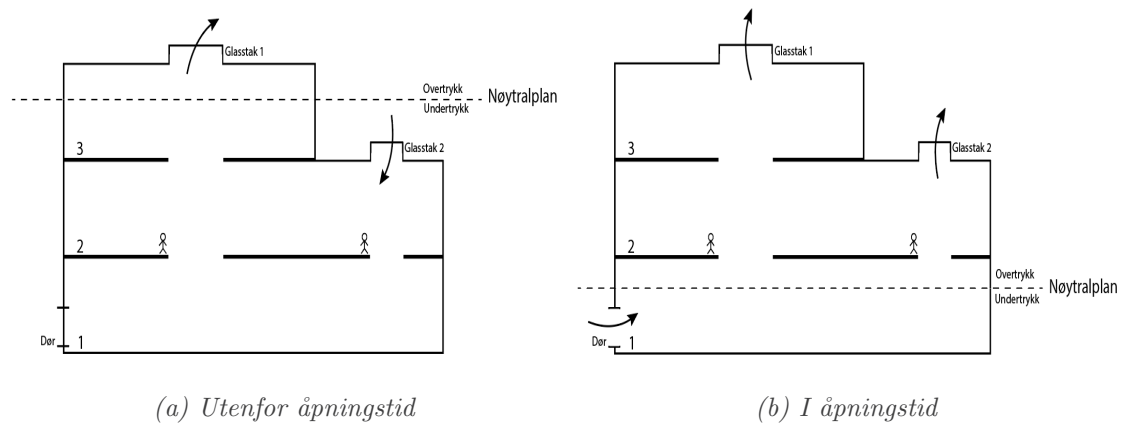
Figur 4.6: Luftstrøm [l/s] gjennom glasstak 1 (venstre kolonne) og 2 (høyre kolonne) for utvalgte dager. Rød: eksfiltrasjon/ut. Grønn: infiltrasjon/inn.

4.2.5 Modeller for utvalgte dager

Det er utarbeidet modeller for å beskrive hvordan trykk påvirker luftstrømmer i bygget gjennom et døgn på vinteren (15. januar), våren (16. april) og sommeren (15. juli). Modellene er basert på resultater fra simulering i IDA ICE. Luften beveger seg fra overtrykk til undertrykk.

Vinter

Figur 4.7 viser trykkforhold og luftstrømmer gjennom åpninger i klimaskjermen før og under åpningstid 15. januar.



Figur 4.7: Modell for hvordan trykkforhold og luftstrømmer varierer gjennom 15. januar.

Om vinteren vil utetemperaturen være lavere enn innetemperaturen gjennom hele døgnet. En lav utetemperatur forårsaker større trykkdifferanse mellom ute og inne (fra vedlegg E.7).

Før åpningstid kl. 10:00 (figur 4.7a) vil utettheter øverst i bygget forårsake et høyt nøytralplan og et undertrykk i store deler av bygget. Ut fra simulering i IDA ICE ligger nøytralplanet mellom glasstak 1 og glasstak 2. Utettheter i glasstak 2, som ligger under nøytralplanet (undertrykk), vil forårsake kaldt trekk inn gjennom lekkasjene. Dette forårsaker at det blir kaldt under glasstak 2 om vinteren (se figur 4.3b). Utenfor åpningstid går luft inn gjennom lekkasjene i dette glasstaket. Figur 4.6b, som viser luftmengder ut og inn av glasstak 2, bekrefter dette.

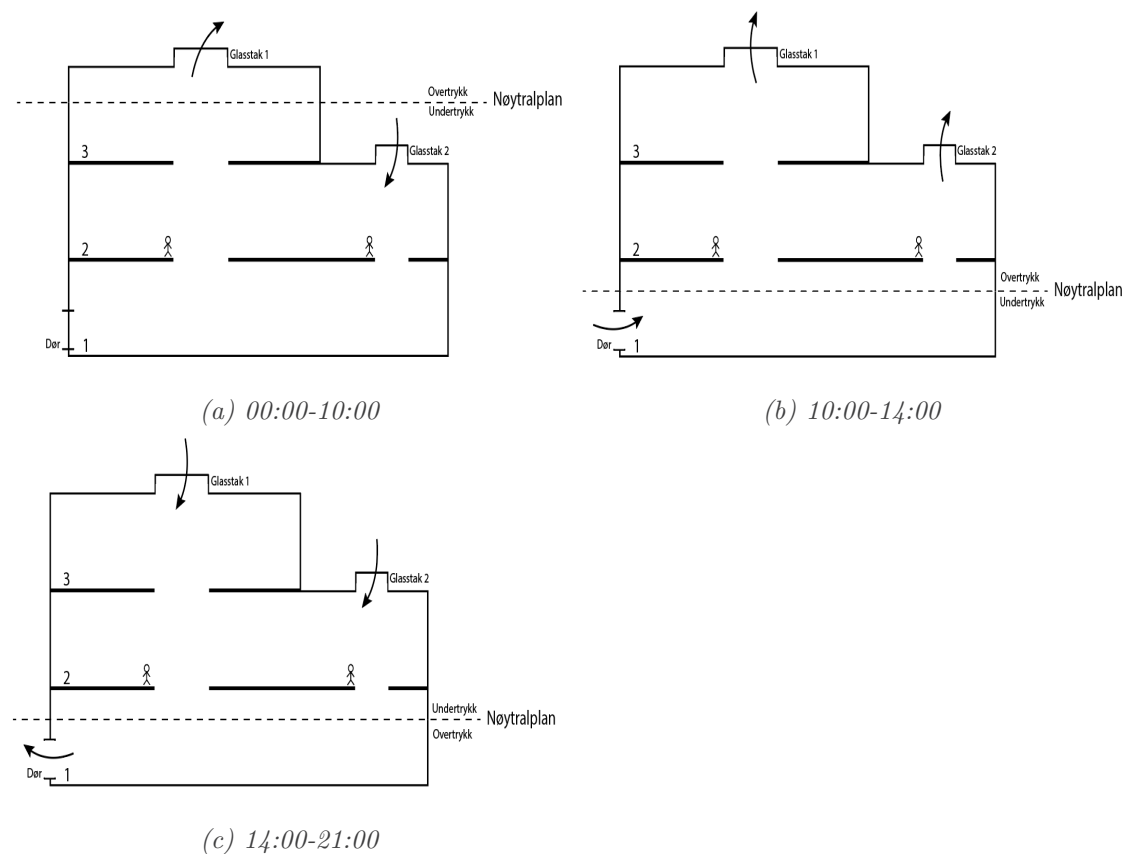
Etter åpningstid (figur 4.7b) vil åpning av døren nederst i bygget forårsake et lavt nøytralplan og overtrykk i store deler av bygget. Et overtrykk i bygget kan også være forårsaket av ubalanse på ventilasjonen. Dette blir diskutert i kapittel 5. Ut fra simu-

lering i IDA ICE ligger nøytralplanet rett over inngangsdøren i 1. etasje. Undertrykk nederst i bygget forårsaker en luftstrøm inn gjennom inngangsdøren. Et større overtrykk øverst i bygget gjør at mer luft presses ut av lekkasjene i begge glasstakene.

Vår

Om våren vil utetemperaturen være lavere enn innnetemperaturen gjennom hele døgnet (fra vedlegg E.7). Både før og under åpningstid om våren er det tilsvarende situasjon som på vinteren (se figur 4.7). Utettheter i glasstak 2 (hvor det er undertrykk) vil forårsake kald trekk i dette området. Det vil ikke bli like kaldt som på vinteren, fordi utetemperaturen er høyere. Utover dagen vil høyt soltilskudd gi høye temperaturer, spesielt øverst i bygget. **Sommer**

Figur 4.8 viser trykkforhold og luftstrømmer gjennom åpninger i klimaskjermen før og under åpningstid (før og etter kl 14:00) 15. juli.



Figur 4.8: Modell for hvordan trykkforhold og luftstrømmer varierer gjennom 15. juli. Figur a) er kl. 00:00-10:00 (før åpningstid). Figur b) er fra kl. 10:00-14:00. Figur c) er fra kl. 14:00-21:00.

Om sommeren vil utetemperaturen være lavere enn innnetemperatur frem til ca. kl. 14:00 og etter ca kl. 22:00 (fra vedlegg E.7). Mellom 14:00-22:00 er utetemperaturen høyere enn innnetemperaturen. I denne perioden er det undertrykk øverst i bygget og overtrykk nederst i bygget. Motsatt trykkprofil som vinter og vår.

Før åpningstid (figur 4.8a) og frem til ca. kl. 14:00 (figur 4.8b) vil det være tilsvarende situasjon som for vinter og vår. Mellom kl. 14:00-21:00 (figur 4.8c) er utetemperaturen høyere enn innnetemperaturen. Dette forårsaker et undertrykk øverst i bygget og et overtrykk nederst i bygget, som gjør at luften vil gå inn gjennom lekkasjer i glasstakene og ut gjennom døren i 1. etasje. Liten forskjell mellom utetemperatur og innnetemperatur gir mindre trykkdifferanse mellom ute og inne og mindre luftstrømmer. Dette er som vist i figur 4.5 (gjennom dør) og figur 4.6 (gjennom lekkasjer i glasstakene).

4.3 Simulering av tiltak

Det er utført simulering av følgende tiltak på glasstakene i IDA ICE, som beskrevet i metodekapittel 3.5. Resultat fra simuleringene er presentert under dette kapittelet, og sammenlignet med grunnlagsmodellen (med luftlekkasjer i glasstaket) som presentert i kapittel 4.2.

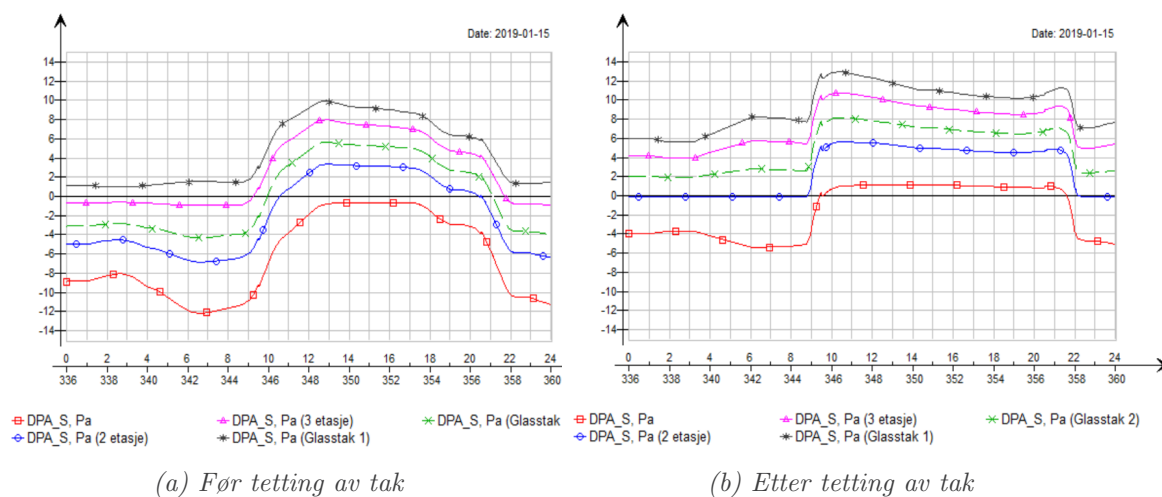
- Tetting av glasstak
- Solskjerming (utvendig, innvendig og microshade)
- Vinduslufting

4.3.1 Tetting av tak

Tetting av luftlekkasjer i taket er simulert i IDA ICE som beskrevet i kapittel 3.5.1. Det er vurdert hvordan tetting av taket påvirker trykkforhold, temperatur og luftstrømmer for en utvalgt dag om vinteren (15. januar), våren (16. april) og sommer (15. juli).

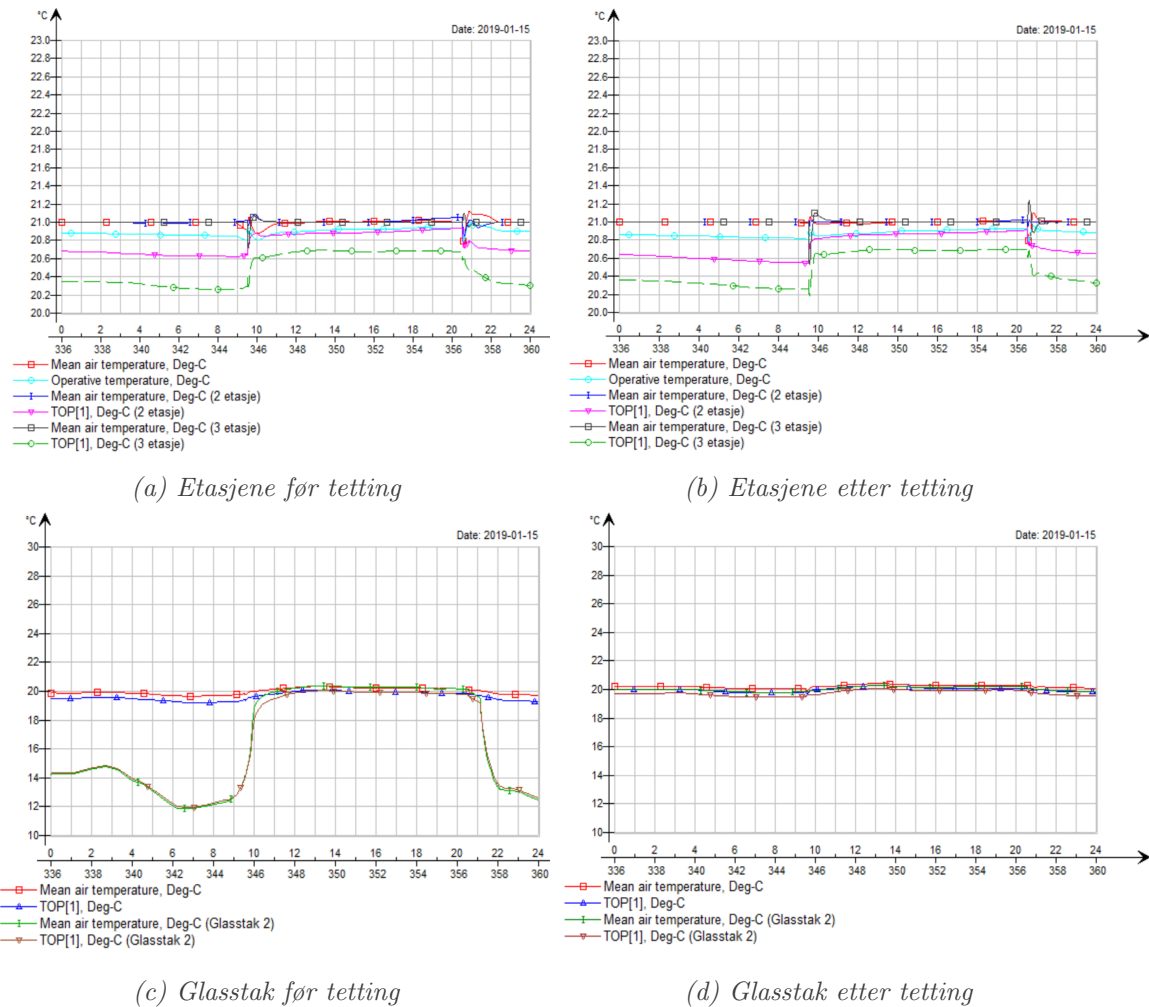
Vinter

Figur 4.9 viser trykkforholdet i bygget før og etter tetting av tak. Tetting av tak vil øke trykket i bygget slik at nøytralplanet ligger i 2. etasje (før 3. etasje) utenfor åpningstid og lavt i 1. etasje (før høyt i 1. etasje) i åpningstiden.



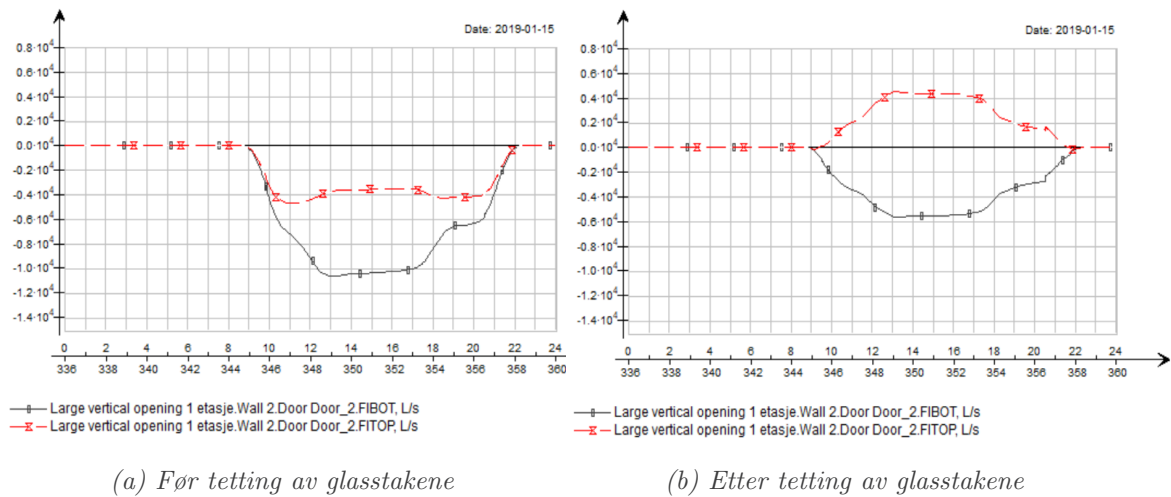
Figur 4.9: Trykkforhold [Pa] i bygget før og etter tetting av glasstakene 15. januar.

Figur 4.10 viser temperaturforhold i etasjene og glasstakene, før og etter tetting av tak.. Resultatet viser liten endring i lufttemperatur og operativ temperatur i etasjene etter tetting av tak. Temperaturen i glasstak 1 endres ikke etter tetting av tak. Temperaturen i glasstak 2 øker med 5-8 °C utenfor åpningstid etter tetting.



Figur 4.10: Operativ temperatur og lufttemperatur i etasjene og glasstak, før og etter tetting av glasstakene 15 januar.

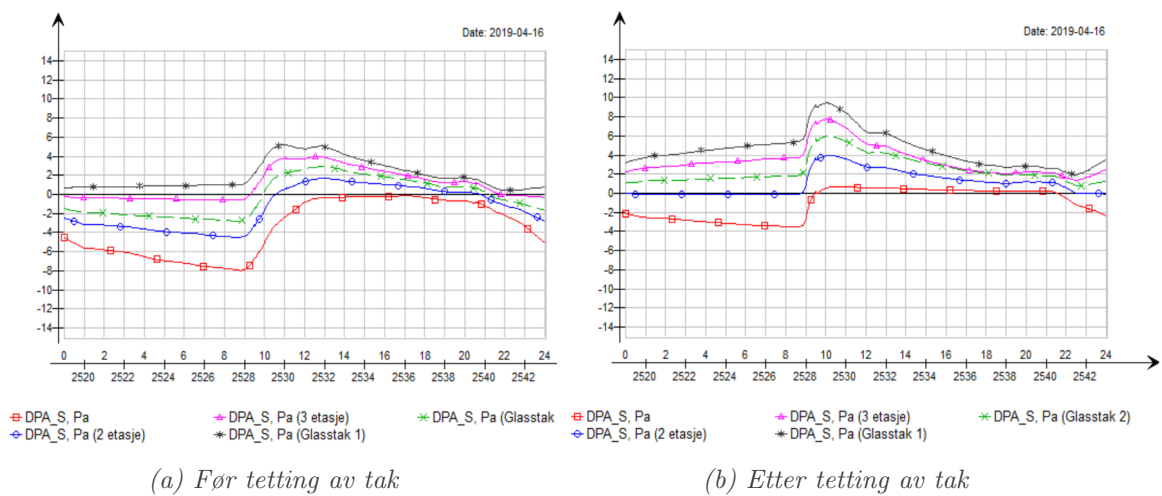
Figur 4.11 viser hvordan luftstrømmen gjennom inngangsdøren endres etter tetting av tak. Etter tetting av glasstakene vil luftstrømmen reduseres, i tillegg til å gå inn nederst i døren og ut øverst i døren gjennom åpningstiden.



Figur 4.11: Luftstrøm [l/s] gjennom inngangsdør før og etter tetting av glasstakene 15 januar.

Vår

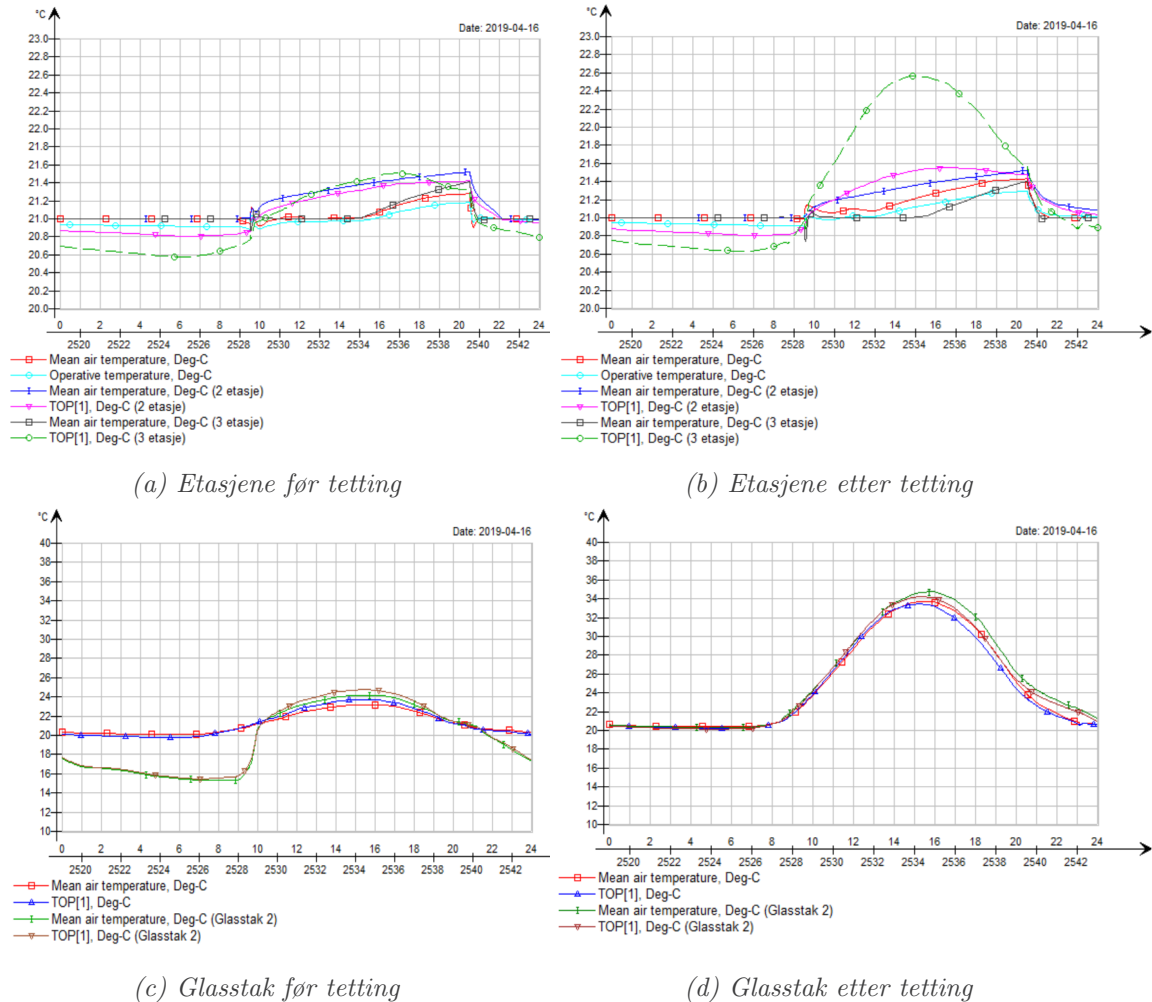
Figur 4.12 viser trykkforholdet i bygget før og etter tetting av tak. Tetting av tak vil, tilsvarende som på vinteren, senke nøytralplanet og øke trykket i bygget. Største trykket i bygget (i glasstak 1) er ca. kl. 10:00. På dette tidspunktet er utetemperaturen på sitt laveste (se vedlegg E.7).



Figur 4.12: Trykkforhold [Pa] i bygget før og etter tetting av glasstakene 16. april.

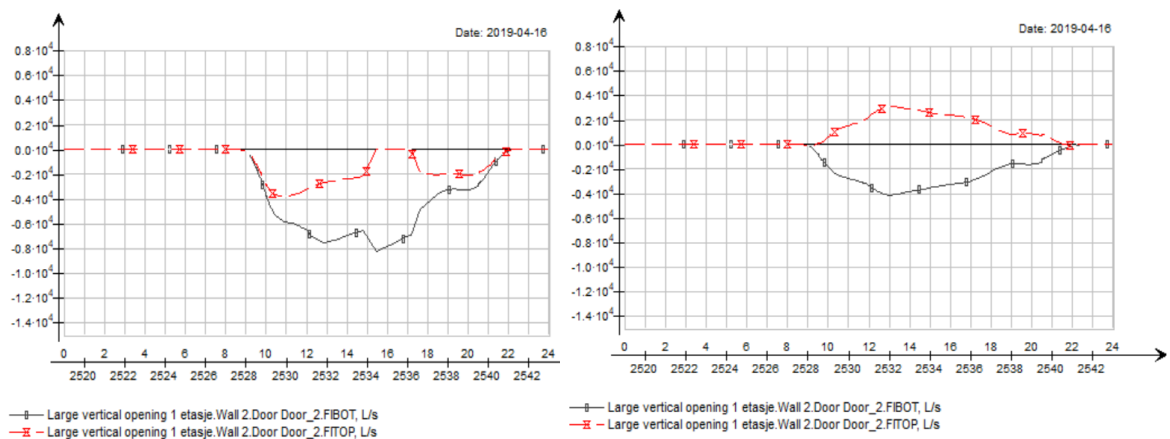
Figur 4.13 viser temperaturforhold i etasjene og glasstakene før og etter tetting av glassakene. Tetting av tak vil øke operativ temperatur i 3. etasje med 1 °C. Tempera-

turene i de andre etasjene har liten endring. Temperatur i glasstak 1 og 2 vil øke og bli opp mot $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ (økning på $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) i åpningstiden, i tillegg til at temperatur i glasstak 2 utenfor åpningstid vil øke til $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tilsvarende glasstak 1).



Figur 4.13: Operativ temperatur og lufttemperatur i etasjene og glasstak, før og etter tetting av glasstakene 16. april.

Figur 4.14 viser hvordan luftstrømmer gjennom inngangsdør endres etter tetting av tak. Luftstrømmen vil reduseres, i tillegg til å gå inn i bunnen av døren og ut gjennom toppen.



(a) Før tetting av glasstakene

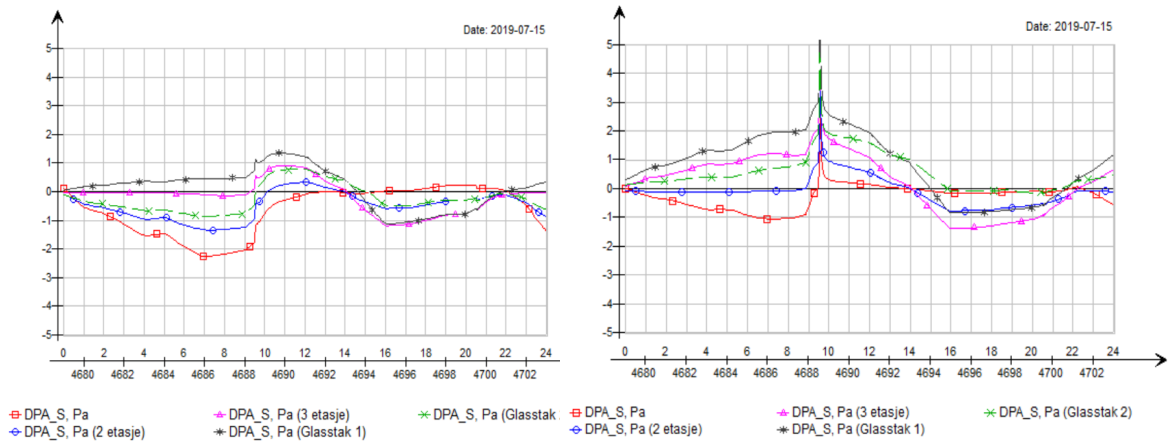
(b) Etter tetting av glasstakene

Figur 4.14: Luftstrøm [l/s] gjennom inngangsdør før og etter tetting av glasstakene 16. april.

Sommer

Tetting av tak har som hensikt å redusere varmetap og kald trekk ved oppvarmingsbehov, men er likevel presentert for sommerdøgn i oppgaven.

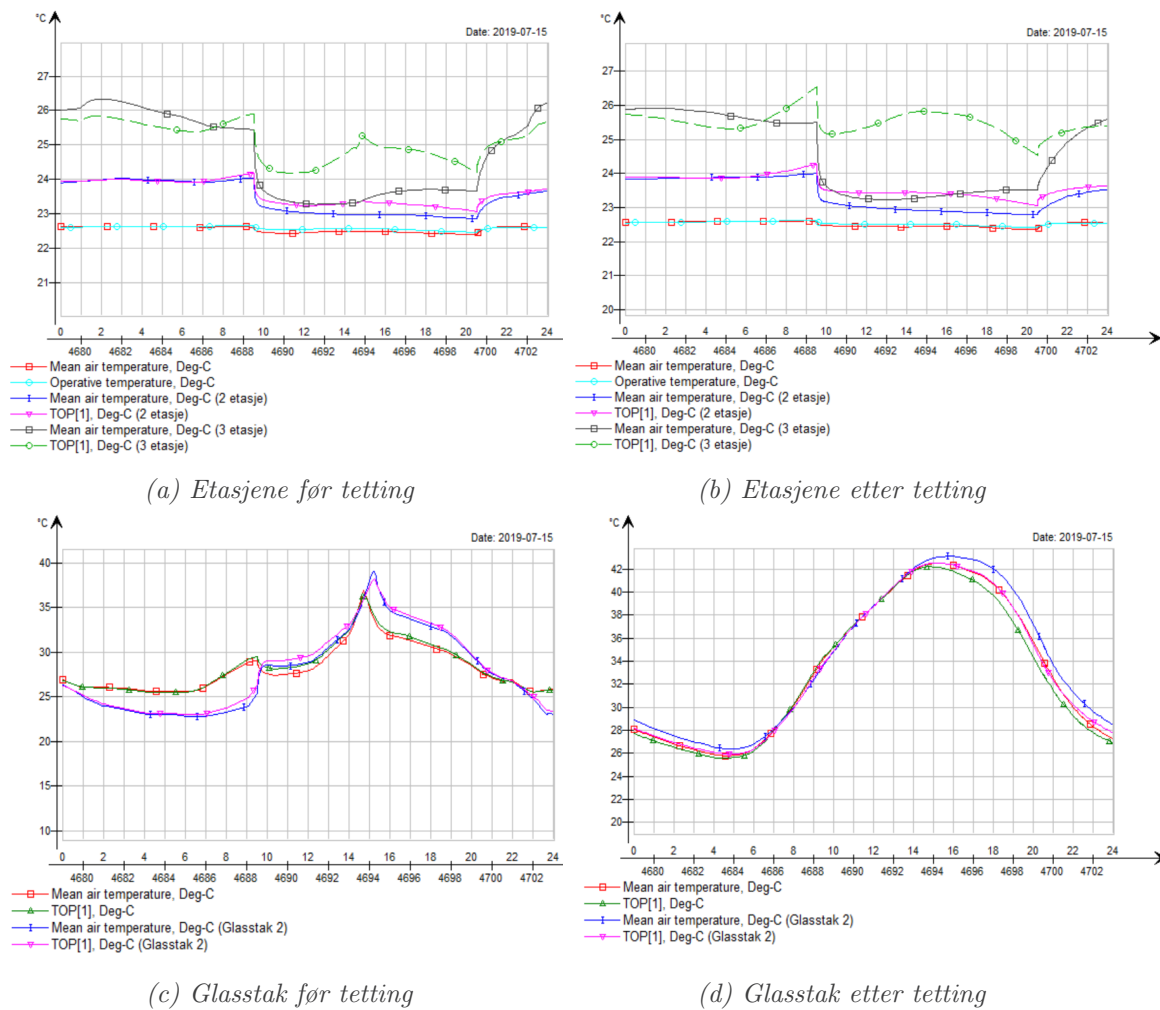
Figur 4.15 viser trykkforholdet i bygget, figur 4.16 viser temperaturfordeling i høyden, figur 4.17 viser luftstrømmer gjennom inngangsdøren. Trykkforholdet i bygget vil øke og nøytralplanet senkes etter tetting av tak. Tiltaket vil øke operativ temperatur i 3. etasje, i tillegg til at temperaturen i begge glasstakene øker. Temperaturendringen i glasstakene gjennom døgnet får en jevnere og lik profil. Luftstrøm gjennom inngangspartiet vil reduseres, i tillegg til å gå både inn og ut av døren.



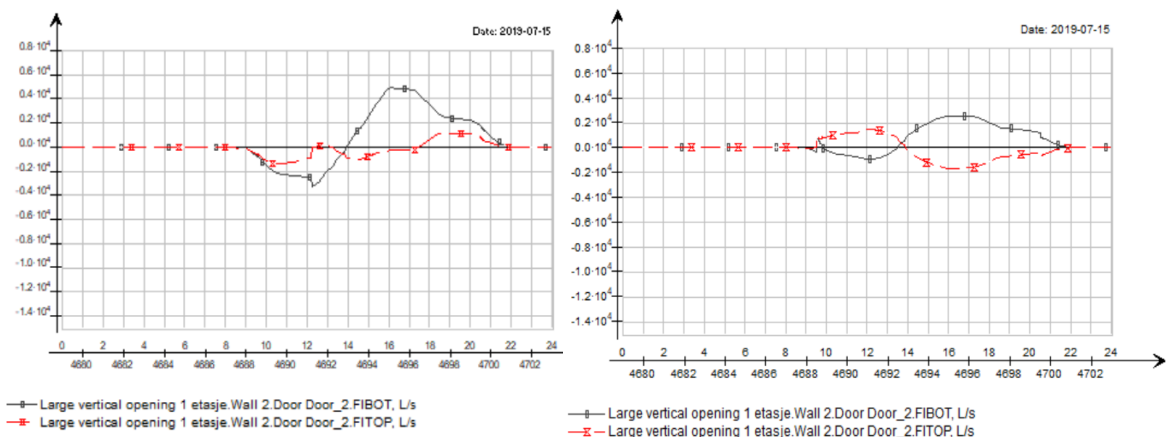
(a) Før tetting av tak

(b) Etter tetting av tak

Figur 4.15: Trykkforhold [Pa] i bygget før og etter tetting av glasstakene. 15 juli.



Figur 4.16: Operativ temperatur og lufttemperatur i etasjene og glasstak, før og etter tetting av glasstakene 15. juli.



(a) Før tetting av glasstakene

(b) Etter tetting av glasstakene

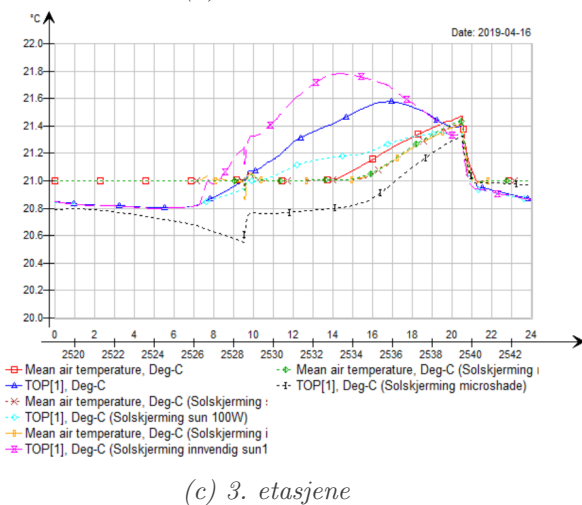
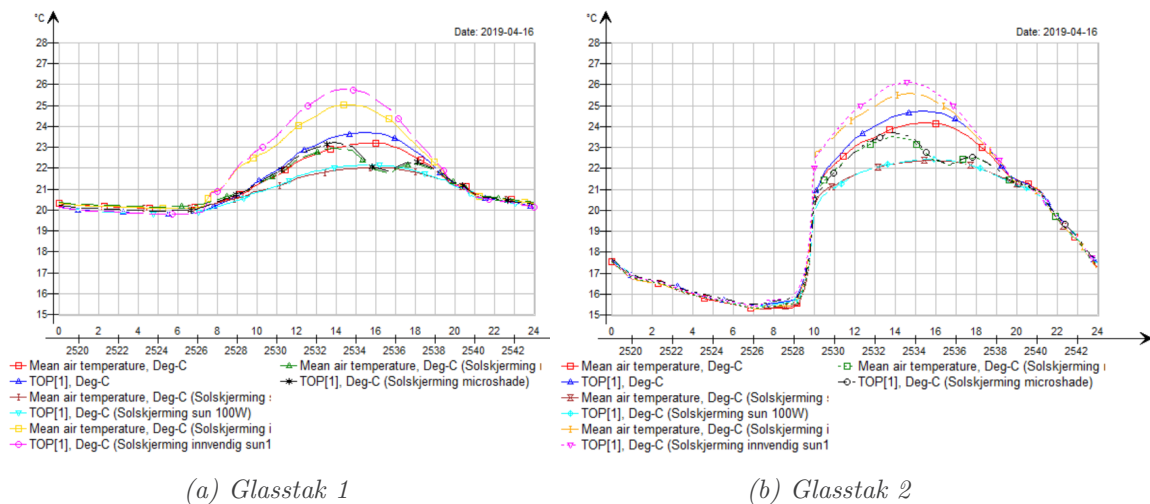
Figur 4.17: Luftstrøm [l/s] gjennom inngangsdør før og etter tetting av glasstakene 15. juli.

4.3.2 Solskjerming

Solskjerming på glasstak 1 og 2 er simulert som beskrevet i kapittel 3.5.2. Det er testet for tre ulike solskjermingsløsninger (utvendig, innvendig og microshade) for vår- og sommerdøgn, og sammenlignet med grunnlagsmodell (uten solskjerming) som beskrevet i kapittel 4.2. Resultatene viser hvordan de ulike løsningene påvirker lufttemperaturer og operativ temperatur i glasstakene og 3. etasje. Temperaturforhold i de andre etasjene er ikke vurdert, da overoppheting i øvre del av bygget er største utfordring. Simulering av de tre solskjermingsløsningene viste liten påvirkning på trykkforhold og luftstrøm gjennom åpninger i klimaskjermen (inngangsdør og lekkasjer i glasstak 1 og 2). Trykkforhold og luftstrømmer med solskjerming er derfor ikke presentert i oppgaven.

Vår

Figur 4.18 viser operativ temperatur i glasstakene og 3. etasje ved bruk av solskjerming 16. april. Simulering viser at utvendig solskjerming er mest effektiv for å redusere overoppheting i glasstakene. Temperaturen i glasstak 1 og 2 reduseres med henholdsvis 2 og 3 °C. Innvendig solskjerming er minst effektiv og vil heve temperaturen i glasstakene. Innvendig solskjerming gir en høyere operativ temperatur enn lufttemperatur. Microshade vil ha største effekt etter ca. kl. 16:00. I 3. etasje vil solskjerming redusere operativ temperatur, men har liten effekt på lufttemperaturen. Microshade vil gi laveste operativ temperatur i 3. etasje. Innvendig solskjerming vil øke operativ temperatur i 3. etasje.



Figur 4.18: Lufttemperatur og operativ temperatur i 3. etasje og glasstak 1 og 2, uten solskjerming, utvendig solskjerming, innvendig solskjerming og microshade 16. april.

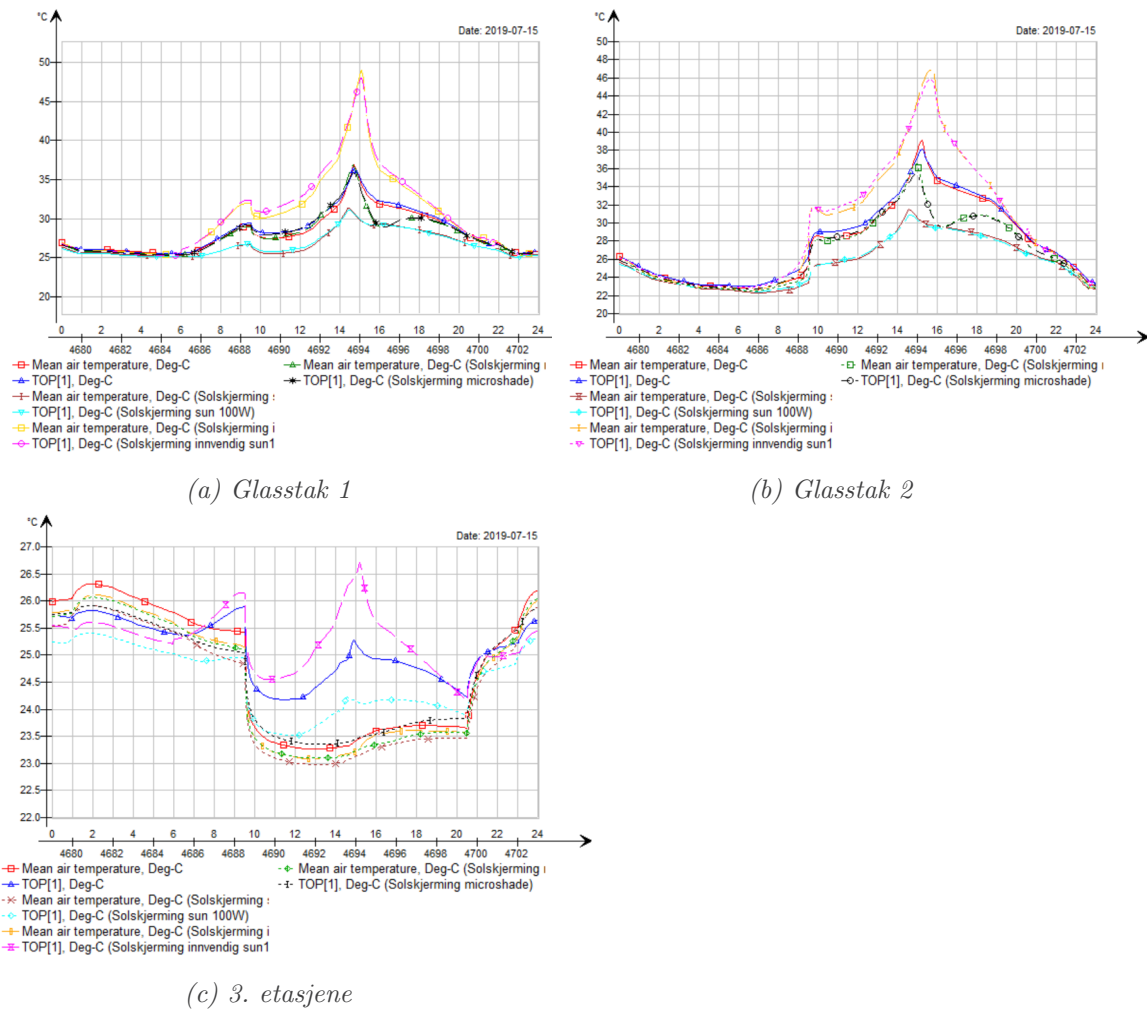
Diagrammene viser lufttemp./op.temp for følgende løsninger:

Rød/blå: uten solskjerming. Brun/Turkis: utvendig solskjerming. Gul/Rosa: innvendig solskjerming. Grønn/svart: microshade.

Sommer:

Figur 4.19 viser operativ temperatur i glasstakene og 3. etasje ved bruk av solskjerming 15. juli. Simulering viser, tilsvarende som på våren, at utvendig solskjerming er mest effektiv. Temperaturen i glasstak 1 og 2 reduseres med henholdsvis 5 og 6 °C ved å bruke utvendig solskjerming. Innvendig solskjerming gir vesentlig høyere temperaturer i glasstakene sammenlignet med ingen solskjerming. Microshade gir ingen effekt sammenlignet med uten bruk av solskjerming, frem til kl. 15-16:00. På ettermiddagen vil bruk

av microshade senke temperaturen i glasstakene med 2-4 °C. I 3. etasje vil solskjerming redusere operativ temperatur, men har liten effekt på lufttemperatur. Microshade vil gi laveste operativ temperatur i 3. etasje. Innvendig solskjerming vil øke operativ temperatur.



Figur 4.19: Lufttemperatur og operativ temperatur i 3. etasje og glasstak 1 og 2, uten solskjerming, utvendig solskjerming, innvendig solskjerming og microshade 15. juli.

Diagrammene viser lufttemp./op.temp for følgende løsninger:

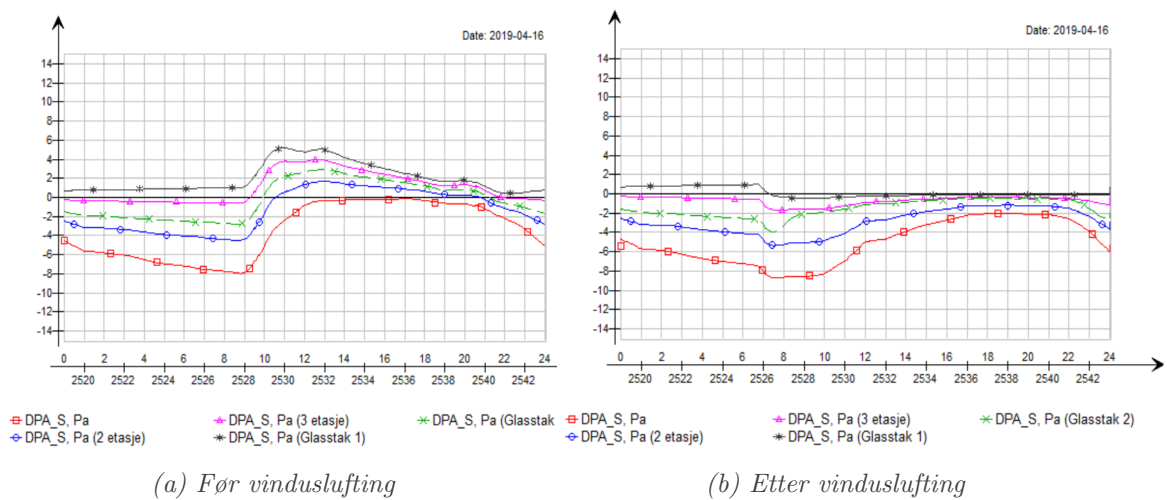
Rød/blå: uten solskjerming. Brun/Turkis: utvendig solskjerming. Gul/Rosa: innvendig solskjerming. Grønn/svart: microshade.

4.3.3 Vinduslufting

Vinduslufting er simulert i IDA ICE som beskrevet i kapittel 3.5.3. Det er simulert for vår- og sommerdøgn og sammenlignet med grunnlagsmodell (uten vinduslufting) som presentert i kapittel 4.2. Aktivering av vinduslufting for både 16. april og 15. juli er kl. 08:00-11:00. Resultat for trykk, temperatur og luftstrømmer er hentet direkte ut fra IDA ICE og presentert under dette kapittelet.

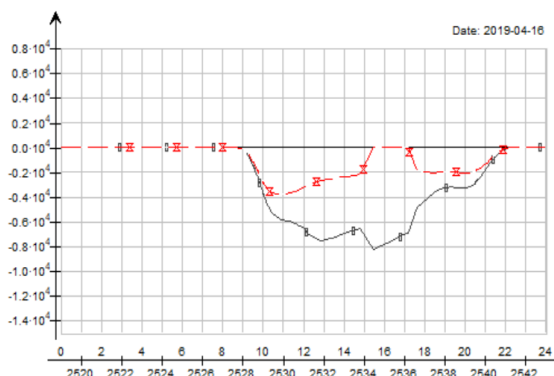
Vår

Figur 4.20 viser hvordan vinduslufting påvirker trykkforholdet i bygget 16. april. Aktivering av vinduslufting vil heve nøytralplanet til øverst i bygget og skape undertrykk i hele bygget.



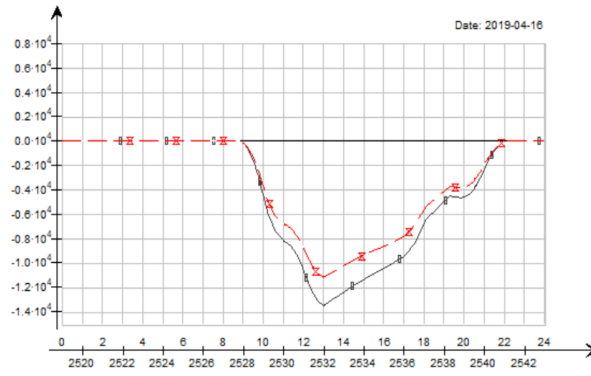
Figur 4.20: Trykkforhold [Pa] i bygget før og etter vinduslufting av glasstakene 16. april.

Figur 4.21 viser hvordan vinduslufting fører til at store luftmengder går inn gjennom inngangsdøren i 1. etasje og ute gjennom glasstak 1 (øverst). Luften gjennom glasstak 2 vil bevege seg inn forårsaket av undertrykk. Det vil også være litt luft som går inn gjennom glasstak 1.



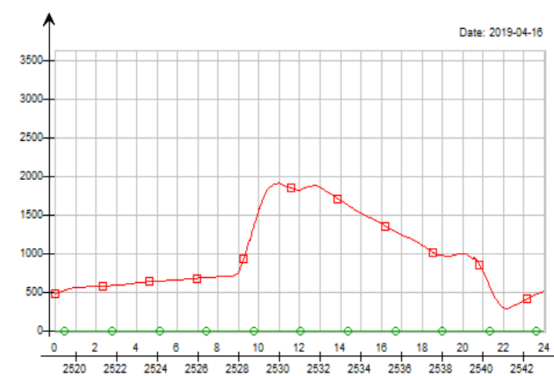
— Large vertical opening 1 etasje.Wall 2.Door Door_2.FIBOT, L/s
 -x- Large vertical opening 1 etasje.Wall 2.Door Door_2.FITOP, L/s

(a) Luft gjennom dør uten vinduslufting



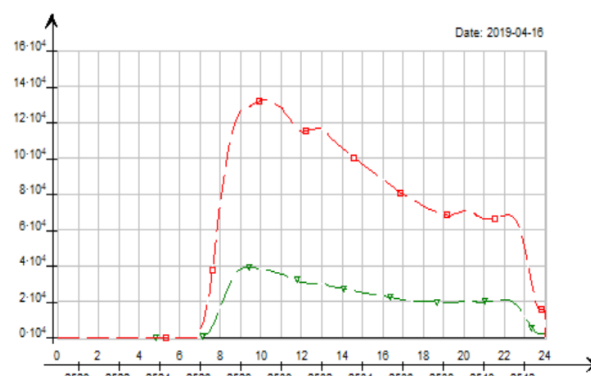
— Large vertical opening 1 etasje.Wall 2.Door Door_2.FIBOT, L/s
 -x- Large vertical opening 1 etasje.Wall 2.Door Door_2.FITOP, L/s

(b) Luft gjennom dør med vinduslufting



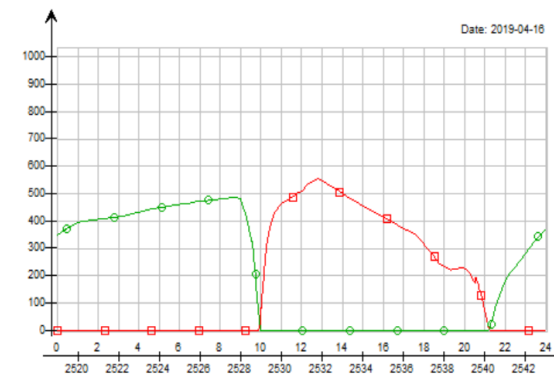
-□- Glasstak 1 LEAK.FI12, L/s
 -○- Glasstak 1 LEAK.FI21, L/s

(c) Luft gjennom glasstak 1 uten vinduslufting



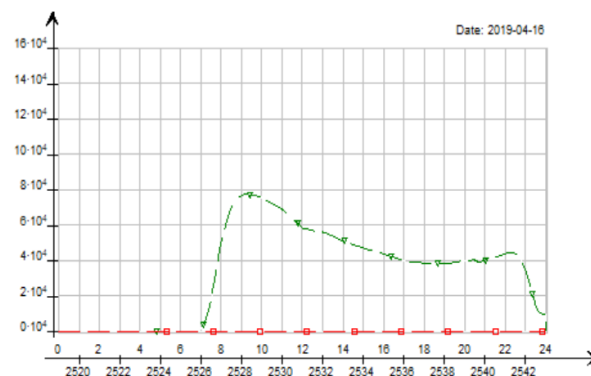
-□- Window (detailed) Glasstak 1.Ceiling.DetWin OpenWin_2.FI21, L/s
 -○- Window (detailed) Glasstak 1.Ceiling.DetWin OpenWin_2.FI12, L/s

(d) Luft gjennom glasstak 1 med vinduslufting



-□- Glasstak 2 LEAK.FI12, L/s
 -○- Glasstak 2 LEAK.FI21, L/s

(e) Luft gjennom glasstak 2 uten vinduslufting

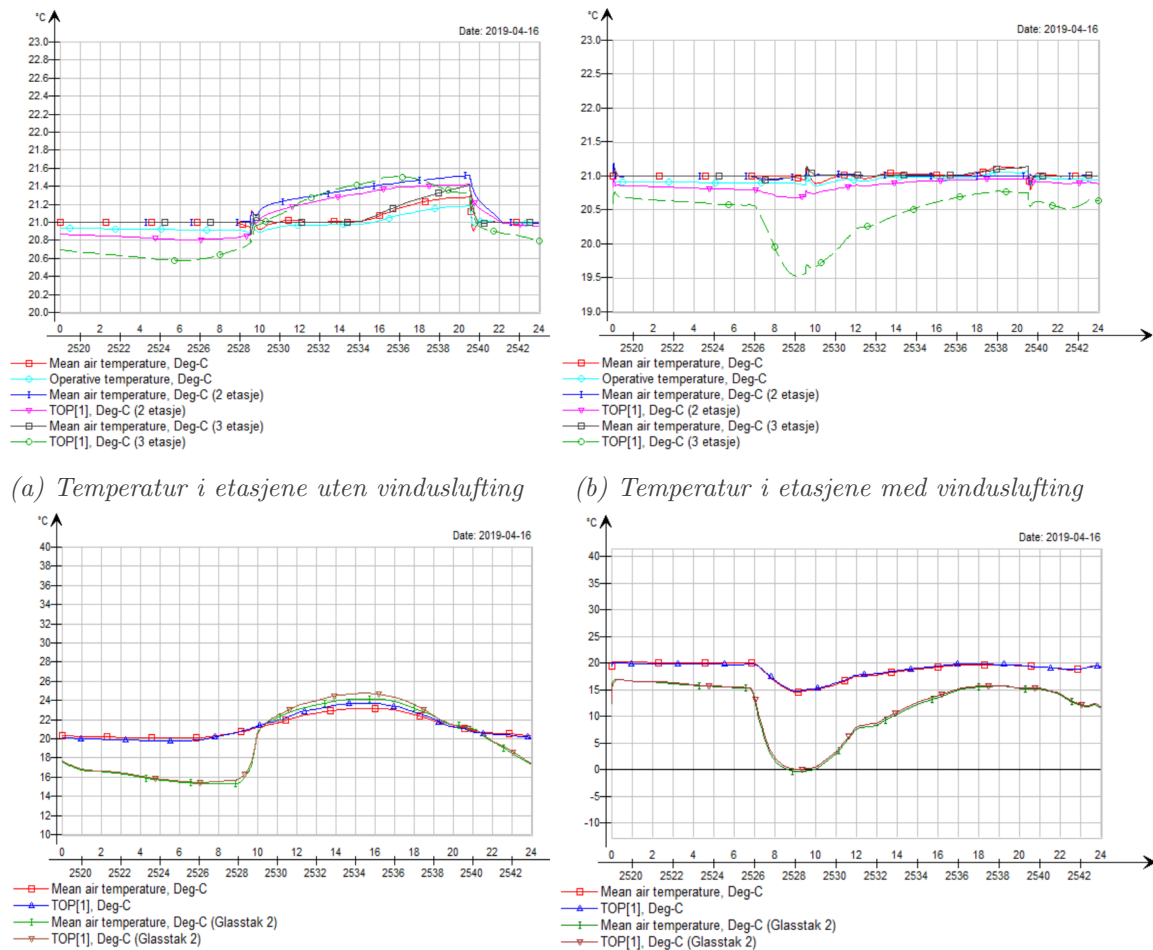


-□- Window (detailed) Glasstak 2.Ceiling.DetWin OpenWin_2.FI21, L/s
 -○- Window (detailed) Glasstak 2.Ceiling.DetWin OpenWin_2.FI12, L/s

(f) Luft gjennom glasstak 2 med vinduslufting

Figur 4.21: Luftstrømmer gjennom inngangsdør og glasstak 1 og 2 [l/s] før og etter vinduslufting av glasstakene 16. april. Rød: eksfiltrasjon/ut. Grønn: infiltrasjon/inn.

Figur 4.22 viser hvordan temperaturforholdet i etasjene og glasstakene påvirkes av vinduslufting. Vinduslufting forårsaker en lite reduksjon temperaturen i etasjene, med lavest operativ temperatur i 3. etasje på morgenen (rett etter vinduslufting aktiveres). I glasstakene vil vinduslufting redusere temperatur med 4 °C midt på dagen, men gi svært lave temperaturer om morgenen (rett etter vinduslufting aktiveres). Dette gjelder spesielt i glasstak 2.

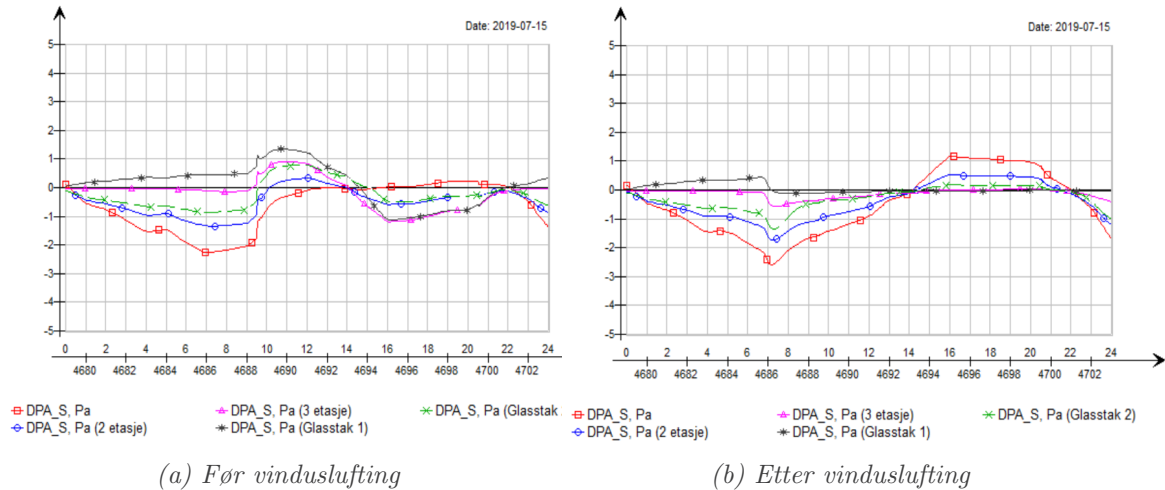


(c) Temperatur i glasstakene uten vinduslufting (d) Temperatur i glasstakene med vinduslufting

Figur 4.22: Operativ temperatur og lufttemperatur i 1-3 etasje og glasstak 1 og 2 [°C] før og etter vinduslufting av glasstakene 16. april.

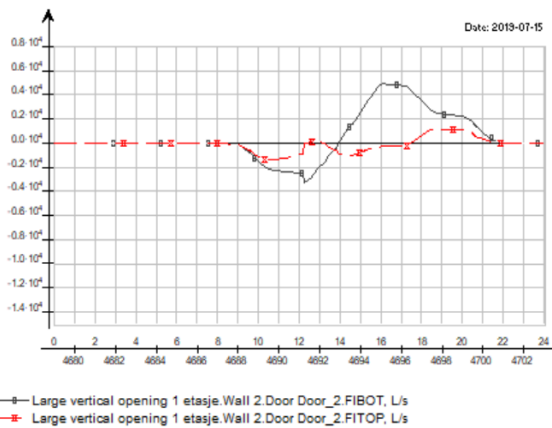
Sommer

Figur 4.23 viser hvordan vinduslufting påvirker trykkforholdet i bygget 15. juli. Aktivisering av vinduslufting vil heve nøytralplanet til øverst i bygget og skaper undertrykk i hele bygget frem til ca. kl. 14:00. Etter dette tidspunktet er utetemperaturen høyere enn innetemperaturen, som resulterer i et overtrykk i store deler av bygget og høyest trykk i 1. etasje.

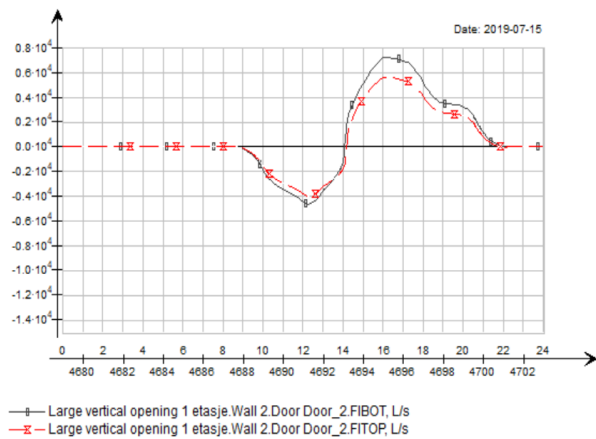


Figur 4.23: Trykkforhold [Pa] i bygget før og etter vinduslufting av glasstakene 15. juli.

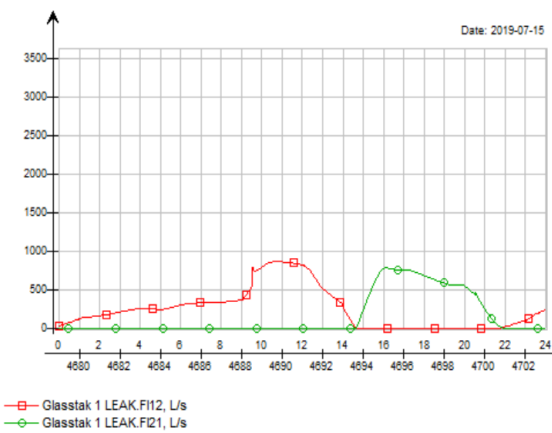
Figur 4.24 viser hvordan luften vil bevege seg gjennom inngangsdør og begge glass-takene, som et resultat av trykkforholdet i bygget denne dagen. Luften gjennom inn-gangsdøren (figur 4.24b) vil bevege seg inn gjennom døren frem til kl. 14:00 og ut gjen-nom døren etter kl. 14:00. Luften gjennom glasstak 1 (figur 4.24d) vil bevege seg både ut og inn når vinduslufting er aktiveres. Størst andel av luft vil gå ut før kl. 14:00 og inn etter kl. 14:00. Luft gjennom glasstak 2 (figur 4.24f) vil bevege seg inn før kl. 14:00 og ut etter kl. 14:00.



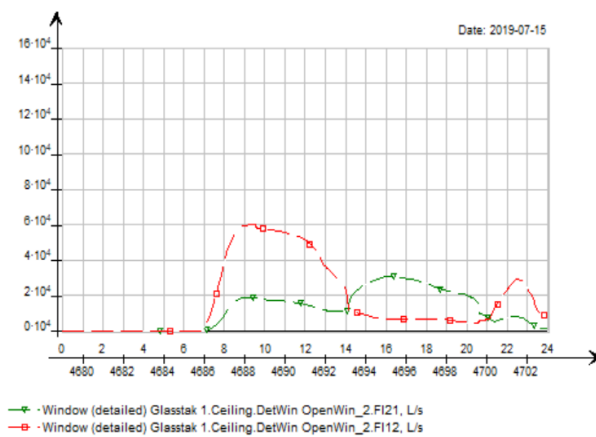
(a) Luft gjennom dør uten vinduslufting



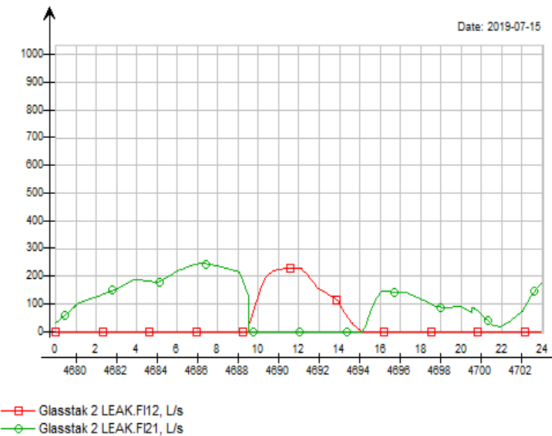
(b) Luft gjennom dør med vinduslufting



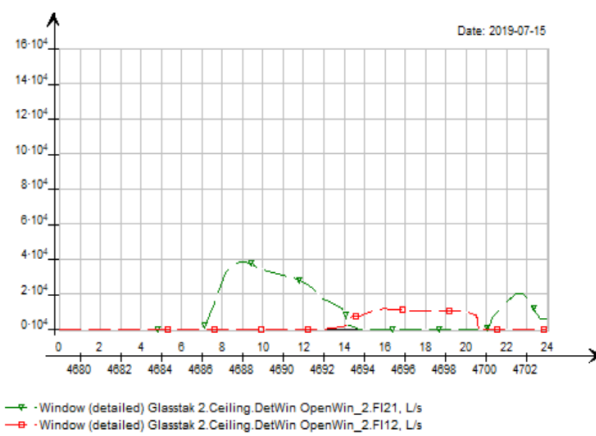
(c) Luft gjennom glasstak 1 uten vinduslufting



(d) Luft gjennom glasstak 1 med vinduslufting



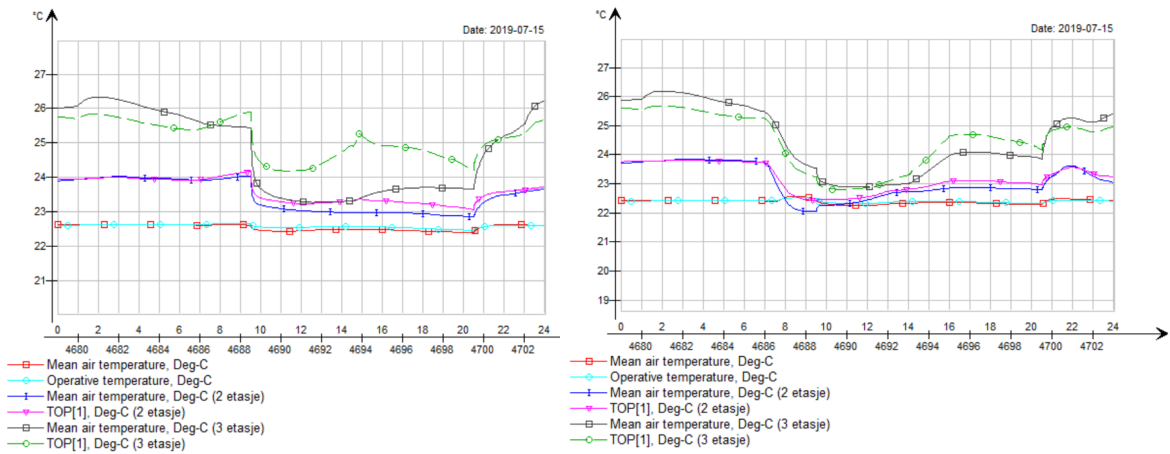
(e) Luft gjennom glasstak 2 uten vinduslufting



(f) Luft gjennom glasstak 2 med vinduslufting

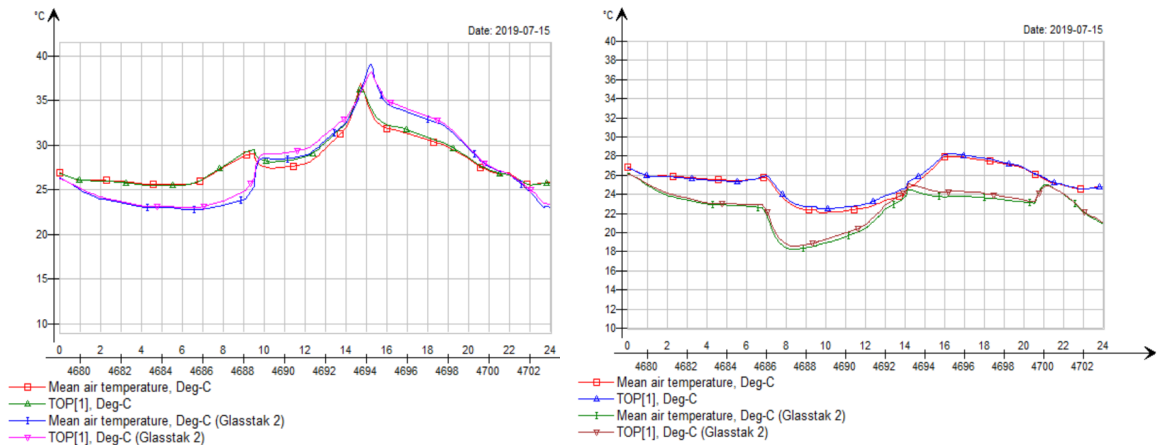
Figur 4.24: Luftstrømmer [l/s] gjennom inngangsdør og glasstak 1 og 2 før og etter vinduslufting av glasstakene 15. juli.

Figur 4.25 viser hvordan temperaturforhold i etasjene og glasstakene påvirkes av vinduslufting. Tiltaket vil redusere operativ temperatur i 3. etasje med 2 °C. I tillegg er det en antydning på at vinduslufting vil redusere lufttemperatur i hver av etasjene. På ettermiddagen vil temperaturen, spesielt i 3. etasje stige igjen. I glasstakene vil vinduslufting redusere temperaturen med 10 °C midt på dagen, men kan gi lav temperatur i glasstak 2 (ned mot 18 °C) rett etter vinduslufting aktiveres.



(a) Temperatur i etasjene uten vinduslufting

(b) Temperatur i etasjene med vinduslufting



(c) Temperatur i glasstakene uten vinduslufting (d) Temperatur i glasstakene med vinduslufting

Figur 4.25: Operativ temperatur og lufttemperatur [°C] i 1-3 etasje og glasstak 1 og 2 før og etter vinduslufting av glasstakene 15. juli.

5 Diskusjon

Denne seksjonen vurderer resultatene i oppgaven opp mot kjent teori og dagens praksis. Det presenteres også anbefalte retningerlinjer for fremtidig dimensjonering av klimatiseringsløsninger i glassgårder.

5.1 Sammendrag av resultater

I denne oppgaven er det undersøkt hvordan åpningsareal og plassering av luftlekkasjer påvirker trykkforhold i bygg. For å redusere trekk og overoppheting i bygget er det vurdert hvordan hvordan tetting av tak, solskjerming og vinduslufting påvirker termisk komfort under glasstaket.

Basert på iterasjonene som er gjort i IDA ICE er det kommet frem til et lekkasjeareal i glasstakene ved Strømmen storsenter på totalt $3,5 \text{ m}^2$ i glasstakene. Lekkasje øverst i bygget vil gi et høyt nøytralplan og undertrykk i store deler av bygget. Undertrykk i glasstak 2 vil forårsake kald trekk og en temperatur ned mot $12 \text{ }^\circ\text{C}$. I åpningstiden vil nøytralplanet ligge over inngangsdøren i 1. etasje og årsaken trekk inn gjennom inngangsdøren.

Tetting av glasstakene vil senke nøytralplanet i og utenfor åpningstiden, og fjerne trekk gjennom glasstak 2 og gjennom døren i 1. etasje. I åpningstiden vil luften kun bevege seg inn og ut av døren.

Av solskjermingsløsningene som er testet er det utvendig solskjerming som har best effekt og kan redusere temperaturen i glasstak 1 og 2 med henholdsvis 1 og $2 \text{ }^\circ\text{C}$ om våren, og 5 og $6 \text{ }^\circ\text{C}$ om sommeren.

Vinduslufting vil redusere temperaturen i glasstak 1 med $4 \text{ }^\circ\text{C}$ om våren, men kan gi risiko for kald trekk under glasstak 2. Om sommeren vil vinduslufting være svært effektivt når utetemperaturen er lavere enn innetemperaturen, og vil redusere overoppheting i glasstakene med $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Når utetemperaturen er høyere enn innetemperaturen vil trykkforholdet i bygget endre seg (undertrykk øverst og overtrykk nederst) og temperaturen i glasstakene øker ved bruk av vinduslufting.

5.2 Airtight målinger

Airtight trykk- og temperaturmålinger som presentert i kapittel 4.1 viser hvordan trykkforholdene ved Strømmen storsenter varierer med utetemperatur og åpninger i klima-

skjermen. Kaldere utetemperatur gir større trykkdifferanse mellom inne og ute, som beskrevet ved likning 2.2 i teorien. Trykkforholdene ved Strømmen kan også være påvirket av trykkubalanse på ventilasjonsanlegget i åpningstiden. Dette er ikke blitt testet i oppgaven, men diskuteres under validering av modell i kapittel 5.3.

Nøytralplanet ved Strømmen storsenter ligger i 3. etasje utenfor åpningstid og forårsaker undertrykk i store deler av bygget. Dersom alle innganger er lukket og ventilasjonsanlegget er skrudd av, som testet med i oppgaven, er det luftlekkasjer øverst i bygget. Basert på teorien om åpningsarealer i klimaskjermen, som beskrevet i kapittel 2.2, betyr det at det er større åpningsareal over nøytralplanet enn under. Et undertrykk nederst i bygget forårsaker kald temperatur nederst i bygget, som vist i airtight målingene. Størrelsen på luftlekkasjer ved Strømmen storsenter, som beregnet ved iterasjon i IDA ICE, er vurdert under validering av modell i kapittel 5.3. I åpningstiden senkes nøytralplanet til 1. etasje, men det ligger fortsatt over inngangsdøren. Et nøytralplan som ligger over inngangsdøren gir undertrykk ved døren og årsaken til trekk inn gjennom inngangsdøren.

Airtight målinger er utført fra oktober 2018 til april 2019. Dette gir ikke mulighet for å vurdere reelle sommerforhold ved senteret. Det er derfor hentet ut måledata for 20. april, som kan gi en indikasjon på hvordan det kan bli på en sommerdag med mye solstråling. Denne dagen var utetemperatur opp mot $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Målingene viser en temperatur i 3. etasje på $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ gjennom hele døgnet. Sammenlignet med 16. april, med en utetemperatur under $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, er det tilsvarende temperatur i 3. etasje gjennom hele døgnet. Årsaken til lik temperatur i 3. etasje for både 16. og 20. april, hvor utetemperaturen varierer med $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, er usikkert. Dette kan skyldes at temperaturen øverst i bygget i stor grad påvirkes av soltilskudd og termisk sjiktning og ikke utetemperaturen. Det var høyt soltilskudd begge dagene. På sommerdager hvor utetemperaturen blir vesentlig høyere enn $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ og sterkere soltilskudd er det mulighet for at temperaturen i 3. etasje blir vesentlig høyere.

I 1. etasje varierer temperaturen mellom $20\text{--}26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 20. april. Høy lufttemperatur inntrer i 1. etasje når utetemperatur er på det høyeste. På dette tidspunktet er det undertrykk i 1. etasje. Sensoren i 1. etasje er plassert ved inngang med glassfasade. Det er derfor antatt at en høy temperatur i 1. etasje skyldes mye solvarme som varmer opp luften rundt dette området, og derfor ikke representativt for hele etasjen. For å vurdere termisk komfort øverst i bygget basert på reelle forhold er det gunstig å måle temperatur øverst i bygget under sommerhalvåret. Dette vil også gi et mer nøyaktig bilde av hvordan eventuelle lekkasjer og soltilskudd i takene påvirker temperaturen øverst i bygget, for både vinter, vår og sommer.

5.3 IDA ICE modell

Ved simulering i IDA ICE er det benyttet en forenklet modell av Strømmen storsenter. Grunnet begrensninger i tilgang på inndata er det derfor gjort antagelser i modellen. Dette gjør at det kan være avvik fra modell og reelle forhold ved Strømmen storsenter. Modellen skal illustrere fellesarealene på senteret, som grenser mot butikkene med en antatt lufttemperatur på $22^{\circ}C$. Det er derfor lagt inn en tilluftstemperatur på $22^{\circ}C$ og overflatetemperatur på andre siden av veggene på $22^{\circ}C$. Den antatte lufttemperaturen ut fra butikkene kan variere gjennom døgnet og året. I IDA ICE er det antatt at denne temperaturen alltid er $22^{\circ}C$ når ventilasjon er på.

I modellen er det benyttet klimadata fra eKlima, hvor dataene er blitt behandlet i excel for å lage en ny klimafil i IDA ICE. Basert på utetemperatur og soltilskudd for de utvalgte dagene (vist i vedlegg E.7 og E.8) er det mulig at dataene er lagt inn i IDA ICE med 1-2t forsinkelse. Dette vil også gi tilsvarende forsinkelse i resultatene.

Åpningsareal på døren i 1. etasje er lagt inn med en driftsplan som vist i figur 3.3. Denne er estimert ut fra driftstid ved Strømmen storenter og antatt åpningsgrad på døren i løpet av døgnet. Åpningsareal på døren har stor påvirkning på trykkforholdene i bygget, da et stort/lite åpningsareal vil senke/heve nøytralplanet. Ved iterering av lekkasjeareal er denne åpningsgraden på døren benyttet. Dersom det er stort avvik fra reell åpningsgrad kan dette ha påvirket lekkasjearealene som er funnet i oppgaven.

Ved modellering i IDA ICE er det benyttet CAV ventilasjon, og ikke tatt hensyn til eventuell trykkubalanse på ventilasjonsanlegget ved Strømmen storsenter. Trykkubalanse på ventilasjonsanlegget vil påvirke trykkforholdene under åpningstiden. Mindre avtrekk eller mer tilluft vil senke nøytralplanet og motsatt vil mer avtrekk eller mindre tilluft heve nøytralplan. En mulig trykkubalanse ved Strømmen storsenter kan gi avvik fra reelle forhold og modell i IDA ICE. Trykkforholdene som benyttet ved simulering i IDA ICE er tilsvarende airtight målinger. Resultatene i oppgaven er derfor vurdert som representative for hvordan trykkforholdene ved Strømmen storsenter vil påvirke luftstrømmer og termisk komfort.

Basert på inndata som er benyttet i modellen og iterasjonsmetoden for å finne lekkasjeareal, er det kommet frem til et lekkasjeareal i glasstakene på $3,5$ totalt m^2 . Dette utgjør kun 13% av arealet på inngangsdøren, men har stor påvirkning på trykkforholdene i bygget. Hypotesen om at det er lekkasjer i øvre del av bygget som forårsaker et undertrykk i bygget og er årsaken til trekkproblematikk gjennom inngangsparti er bekreftet. Det stilles imidlertid usikkerhet ved størrelsen på lekkasjene som beregnet i

IDA ICE. Dersom inndata som benyttet i modellen har stort avvik fra reelle verdier, kan det påvirke beregnet luftlekkasje. Det anbefales å utføre luftlekkasjemålinger for å finne eksakt lekkasjetall.

Om vinteren og våren vil et undertrykk medføre trekkproblematikk inn gjennom glass-tak 2 utenfor åpningstid og trekk inn gjennom inngangsdør i åpningstiden. Gjennom lekkasjer i glasstak 1 vil det gjennom hele døgnet være varmetap på grunn av eksfiltrasjon. Simulering av høye luftmengder og lave temperaturer underbygger dette. Trykkmålinger utført av airtight måler ikke trykket i glasstakene. Det er derfor usikkerhet om hvor høyt nøytralplanet ligger. Et undertrykk i glasstak 2 utenfor åpningstiden og årsaken til trekk her, er derfor basert på modellen i IDA ICE.

Om våren vil lekkasjer forårsake tilsvarende trykkprofil som på vinteren, men med lavere trykkdifferansen mellom inne, grunnet en høyere utetemperatur. Vårdøgnet som er simulert har en utetemperatur mellom 0-15 °C og mye soltilskudd gjennom dagen, som kan forårsake store variasjoner i temperatur gjennom døgnet. Utenfor åpningstid blir det kaldt under glasstak 2 grunnet kald trekk gjennom lekkasjer, samtidig som det utover dagen blir varmt i glasstakene grunnet soltilskudd. Operativ temperatur i 3. etasje vil variere gjennom døgnet grunnet lav utetemperatur om morgenen (som forårsaker kalde flater) og høyt soltilskudd utover dagen (som forårsaker varme flater).

Om sommeren vil trykkdifferansen mellom inne og ute være vesentlig lavere enn om våren og vinteren, grunnet liten forskjell mellom ute og innetemperatur. Høyt soltilskudd og termisk oppdrift vil forårsake svært høye temperaturer i begge glasstakene. Samtidig vil også operativ temperatur i 3. etasje bli høy grunnet mye soltilskudd. Når utetemperaturen blir høyere enn innetemperaturer gir det utfordringer for klimatisering av bygget. Mer om dette er diskuteres under vinduslufting som tiltak i kapittel 5.5.

En person plassert under glasstak 1 og 2 vil oppleve ulik temperatur. Kald trekk i glasstak 2 vil påvirke dette området i større grad. Avstand fra glassfasaden har stor påvirkning på operativ temperatur. Grunnet store variasjoner i glassfasader gjennom døgnet og årstider, kan det derfor være hensiktsmessig å vurdere om en oppholdssonen 0,6m fra vegg og 1,8m over bakken er riktig for denne typen bygg.

IDA ICE beregner med diffus stråling fra sola og tar ikke hensyn til direkte stråling. Det kan derfor oppleves enda varmere enn hva resultatene tilsier i IDA ICE. Dette vil spesielt påvirke personer plassert i øvre del av bygget og midt på dagen da solhøyden er størst.

5.4 Sammenligning av airtight og IDA ICE

Modellering i IDA ICE er basert på trykkforholdene fra Airtight. Trykkforholdene fra Airtight og modell er derfor tilsvarende. I dette kapittelet diskuteres overensstemmelsen mellom lufttemperaturmålinger fra Airtight og fra simulering i IDA ICE, som presentert i henholdsvis figur 4.1 og 4.3.

For vinteren (15. januar) er det 13-20 °C i 1. etasje og 21 °C i 3. etasje gjennom hele døgnet basert på airtight. Tilsvarende dag i IDA ICE er det 21 °C gjennom hele døgnet, både i 1. og 3. etasje. En konstant temperatur i IDA ICE skyldes at setpunkt for oppvarming styrer lufttemperaturen til minimum 21 °C. Dersom oppvarming reduseres om natten, vil også temperaturen synke. En lavere temperatur i airtight kan skyldes at oppvarming reduseres om natten eller at det er lekkasjer og varmetap gjennom inngangsdører og glassfasader i 1. etasje. I tillegg vil varm luft stige og forårsake lavere temperatur nederst i bygget. Det er ikke målt temperatur i 2. etasje ved Strømmen storsenter og derfor ikke mulig å vurdere om det er undertrykk og kald trekk gjennom glasstak 2, slik som simulert i IDA ICE.

For våren (16. april) er det 19-22 °C i 1. etasje og 23-24 °C i 3. etasje basert på airtight. Tilsvarende dag i IDA ICE er det 20-21 °C både i 1. og 3. etasje. Glasstakene i IDA ICE måler 24 °C. En høyere temperatur i 3. etasje ved Strømmen kan skyldes at temperaturen har større påvirkning fra glasstaket enn simulert i IDA ICE. En temperaturen i glasstakene i IDA ICE som er tilsvarende temperaturen i 3. etasje ved Strømmen tyder på dette. Sensoren er plassert opp under tak i 3. etasje og kan derfor i større grad være påvirket av et termisk sjikt øverst i bygget. Resultatene viser en temperaturprofil som vist i figur 2.2. Flere temperaturmålinger vertikalt i bygget, og spesielt opp under glasstaket, kunne underbygget en slik temperaturprofil.

5.5 Vurdering av tiltakene

Etter modellering av Strømmen storsenter i IDA ICE er det simulert ulike tiltak for å redusere kald trekk og overoppheting i glassgården. Resultatene fra tetting av tak, solskjerming og vinduslufting er vurdert under denne seksjonen.

Tetting av tak

Tetting av tak vil forskyve nøytralplanet og fjerner luftlekkasjer gjennom glasstakene og trekk gjennom inngangsdøren. Hypotesen om at tetting av tak vil forbedre trekkproblematikk er derfor bekreftet. Et nøytralplan som ligger midt i inngangsdøren i åpningstiden

vil gjøre at luften kun beveger seg inn nederst i døren og ut øverst i døren. Dette er som vist i figur 2.3 i teorien om trykkforhold.

Om vinteren vil trykkendring grunnet tetting av tak forårsake liten endring i temperatur i 1-3 etasje. Årsaken til dette vil trolig være at setpunkt for oppvarming er satt til 21 °C og temperaturen i rommet vil derfor ikke gå under denne temperaturen. Ved stort undertrykk i 1. etasje (uten tetting av tak) må oppvarming kompensere for kald luftstrøm gjennom inngangsdøren. Dette vil forårsake et høyt energibruk. Dersom tetting av glasstaket vurderes, anbefales det derfor å gjøre en vurdering av sparepotensiale for energibruk til oppvarming. Området under glasstak 2 vil ha stor trekkproblematikk dersom ikke taket tettes. Simulering i IDA ICE viser derfor hvordan luftlekkasjer der det er undertrykk, vil være svært kritisk når utetemperaturen er lav.

Tetting av glasstak vil ha en større negativ påvirkning om våren enn om sommeren. Om våren øker temperaturen i glasstakene med 10 °C, mens om vinteren kun med 2 °C. Årsaken til en større temperaturøkning i glasstakene om våren kan være at luftlekkasjer i glasstakene har større negativ påvirkning på våren når trykkdifferansen mellom ute og inne er større (grunnet lavere utetemperatur). Forskjellen mellom før og etter tiltak blir derfor større om våren. En økning av operativ temperatur i 3. etasje (for både vår og vinter) etter tetting av tak skyldes en varmere overflatetemperatur.

For å redusere høye temperaturen øverst i bygget vil det være nødvendig med tiltak som solskjerming og/eller vinduslufting. Resultat fra simulering av disse tiltakene er diskuteres under.

Solskjerming

Av solskjermingsløsningene som er testet er det utvendig solskjerming som gir størst effekt i glasstakene om våren og sommeren, ved å redusere temperaturen i glasstakene med henholdvis 1-3 °C og 5-7 °C. Microshade vil også gi tilsvarende temperaturfall midt på dagen, men temperaturen vil øke igjen senere på dagen. Årsaken til dette vil trolig være at lamellene i microshade er påvirket av innfalsvinkelen på solstråling, og vil derfor gi mindre effekt ved lavere solhøyde. Innvendig solskjerming vil øke temperaturen i glass-taket og er derfor ikke anbefalt. Innvendig solskjerming vil som forventet forårsake en svært høy overflatetemperatur på glassoverflaten.

I 3. etasje vil bruk av utvendig solskjerming og microshade redusere operativ temperatur, men har liten påvirkning på lufttemperatur. Forklaring på det kan være, som diskutert under kapittel 5.4 (sammenlikning av airtight og IDA ICE), at temperaturen i 3. etasje vil ha større påvirkning av temperaturen i glasstaket ved Strømmen storsenter enn simulert i IDA ICE. Det kan derfor forventes at solskjerming også vil påvirke

lufttemperaturen i 3. etasje.

Vinduslufting

Vinduslufting vil påvirke trykkforholdet i bygget ved å heve nøytralplanet og skape et undertrykk i hele bygget. Dette forklares i likning 2.4 hvor A_2 er mye større enn A_1 . Sammenlignet med solskjerming vil vinduslufting påvirke luftstrøm i bygget, men ikke redusere solinnstråling gjennom glassfasaden.

Om våren vil vinduslufting redusere overoppheting i begge glasstakene, men gi stor risiko for kald trekk gjennom hovedsakelig glasstak 2. Simulering av temperatur viser at det kan bli svært lave temperaturer under glasstakene når vinduslufting aktiveres kl. 08:00 om morgenen. Det vil bli betydeligere kaldere under glasstak 2 enn under glasstak 1. Dette skyldes et lavere undertrykk i glasstak 2, som forårsaker større trekk inn gjennom dette glasstaket. Vinduslufting tidlig på morgenen (ved lav utetemperatur) i glasstak 2 må derfor unngås. Det kan være hensiktsmessig å kun aktivere vinduslufting i glasstak 1 (øverste glasstaket). Utover dagen, med høyere utetemperatur og med stort varmetilskudd fra sola, vil vinduslufting være svært gunstig.

Om sommeren er vinduslufting svært effektivt for å redusere overoppheting øverst i bygget. Vinduslufting om sommeren gir derimot utfordringer når utetemperaturen blir høyere enn innetemperaturen. En høyere utetemperatur forårsaker motsatt trykkprofil, som skaper undertrykk øverst og overtrykk nederst. Denne trykkprofilen er årsaken til at temperaturen i glasstakene om sommeren vil øke igjen etter ca. kl. 14:00. Vinduslufting bør derfor ikke benyttes når utetemperaturen er høyere enn innetemperatur. Grunnet høyere utetemperatur om sommeren enn om våren vil det ikke bli risiko for trekk gjennom glasstak 2. En kombinert løsninger av både vinduslufting og solskjerming på varme dager bør derfor vurderes.

5.6 Videre arbeid

Denne oppgaven har ikke vurdert sparepotensial ved tetting av glasstak. En reduksjon i luftlekkasjer og forbedring av termisk komfort antyder derimot et stort potensiale. Videre vurdering av dette bør utføres dersom tiltakene vurderes.

Oppgaven har vist hvordan trykkforholdet i bygget varierer med utetemperatur og åpninger i klimaskjermen. Et større fokus på trykkforhold ved prosjektering av fremtidige klimatiseringsløsninger av glassgårder er, som følge av denne oppgaven, sett på som hensiktsmessig.

Det i dag et økt fokus på dagslys og store glassfasader. Dette gjør at solskjerming og vinduslufting blir enda viktigere for å unngå overoppheting. Videre forskning på hvilke løsninger som passer best ut fra ulikt behov og variasjon i klima, er derfor viktig. Solskjerming og vinduslufting har ulik påvirkning, hvor vinduslufting fjerner varm luft og solskjerming stenger for soltilskudd. Videre vurdering av solskjerming og vinduslufting i kombinasjon basert på variasjon i klima er derfor hensiktsmessig.

6 Konklusjon

Tetting av luftlekkasjer i glasstaket vil senke nøytralplanet og redusere trekk gjennom inngangsparti i 1. etasje. Ytterligere vil det fjerne trekk gjennom andre lekkasjer og risiko for lav innnetemperatur der det er undertrykk.

For å redusere overoppheting i høye glassgårder viser simulering i IDA ICA at en kombinasjon av både vinduslufting og solskjerming kan være nødvendig, da løsningene har ulik påvirkning. Vinduslufting gir større temperaturfall enn solskjerming. Vinduslufting vil derimot gi risiko for trekk ved lave utetemperaturer og kan være mot sin hensikt når utetemperaturen er høyere enn innnetemperaturen.

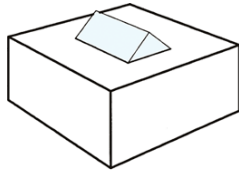
Referanser

- [1] Direktoratet for byggkvalitet. Byggteknisk forskrift (tek 17). URL <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>.
- [2] SINTEF Byggforsk. 421.132 fukt i bygninger. teorigrunnlag, . URL <https://www.byggforsk.no/innhold/2/byggdetalje>.
- [3] Store norske leksikon. arkimedesloven, 2018. URL <https://snl.no/arkimedesloven>.
- [4] Ole B. Stampe. *Varme og klimateknikk*. Danvak ApS, 2000.
- [5] Ida Bryn and Per Arne Schiefloe. *Atrium Models for the Analysis of Thermal Comfort and Energy use*. International energy agency, 1996.
- [6] Peter G Schild Elisabeth N Haugen Gertrud Nilson Kjell Høydal Arnkell Jonas Petersen, Ida H. Bryn. Forhold tilknyttet bruk av roterende gjenvinnere i skoler, 2009.
- [7] Ida Bryn. *Glass i fasader og lufttetter*. Erichsen & Horgen, 2005.
- [8] Ida Bryn. Glass i fasader og solskjerming.
- [9] SINTEF Byggforsk. 527.231 glassgårder i store bygg. temperatur- og energiforhold, . URL <https://www.byggforsk.no/innhold/2/byggdetalje>.
- [10] International Energy Agency. Models for building indoor climate and energy simulation, 1999. URL <https://www.equa.se/dncenter/T22Brep.pdf>.
- [11] SINTEF Byggforsk. 421.501. termisk inn klima. betingelser, tilrettelegging og målinger, . URL <https://www.byggforsk.no/innhold/2/byggdetalje>.
- [12] Meteorologisk institutt. Weatherapi.
- [13] Energinet. Energinet. URL <https://www.energinet.net/site/login>.
- [14] Norsk standard. Ns3031: Beregning av bygningers energiytelse - metode og data, 2014. URL <https://www.standard.no/>.
- [15] Meteorologisk institutt. klima, 2019.
- [16] International Organization for Standardization. Thermal per-

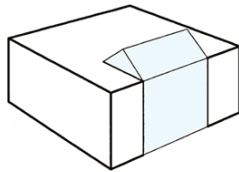
formance of windows, doors and shading devices, 2003. URL
<https://www.iso.org/standard/26425.html>.

Vedlegg

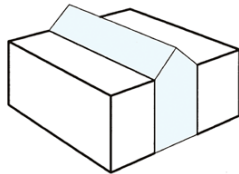
A Utforming av glassgårder



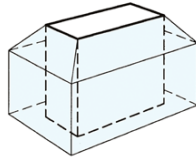
Innelukket



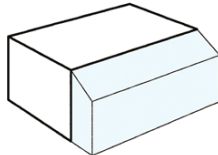
Integrent



Lineær



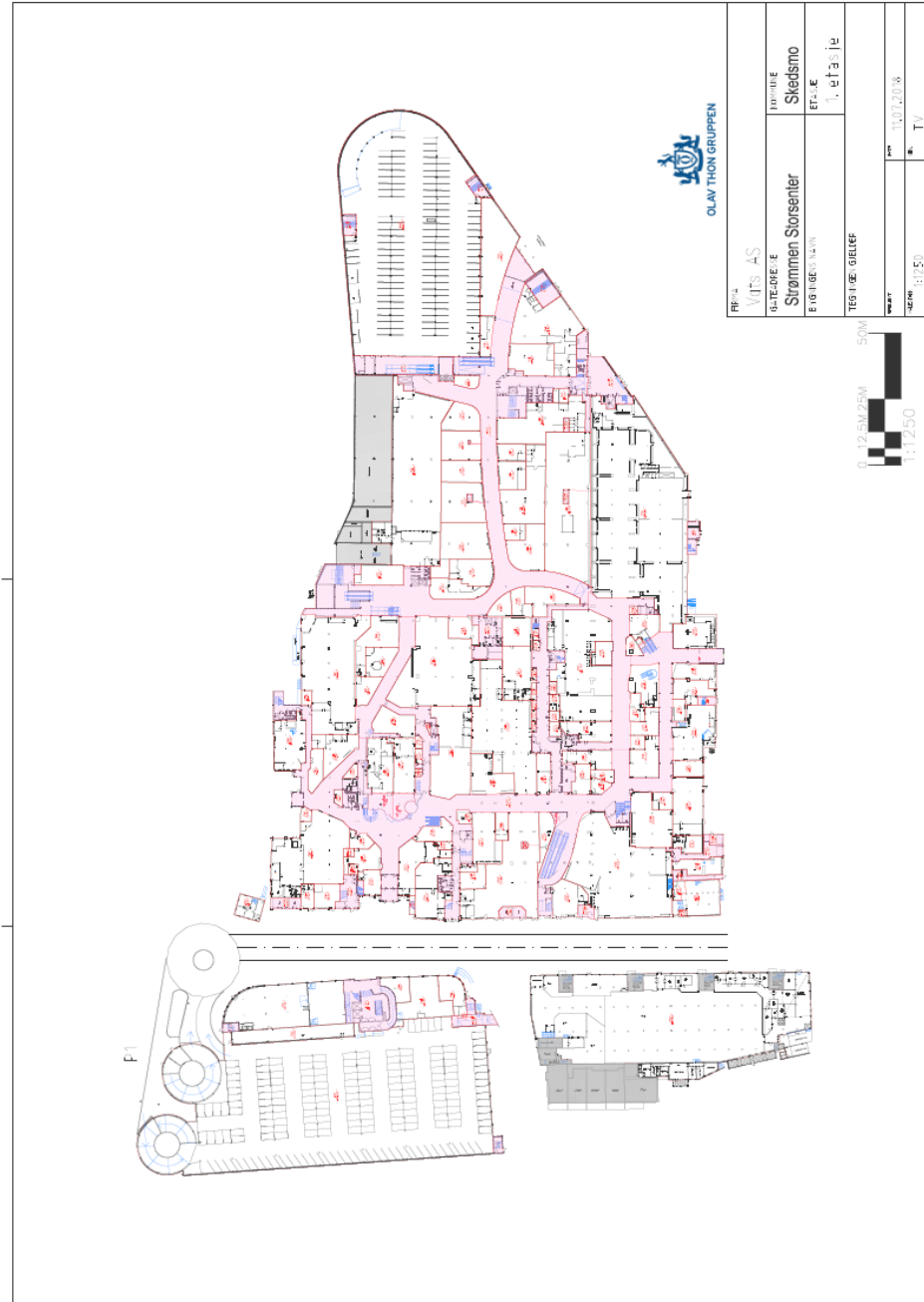
Omhyllende



Tilbygg

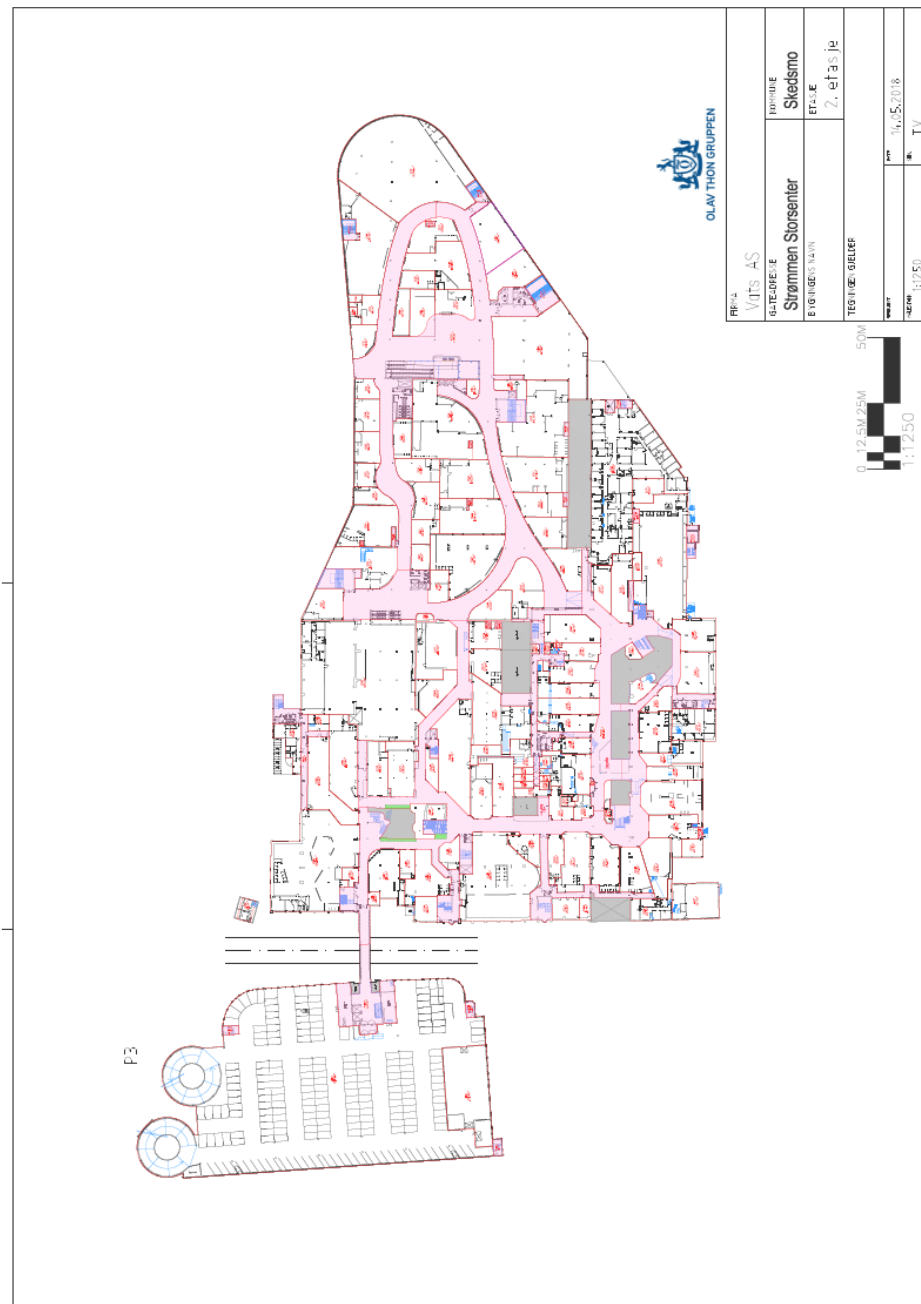
B Plantegning Strømmen storsenter

B.1 1. etasje



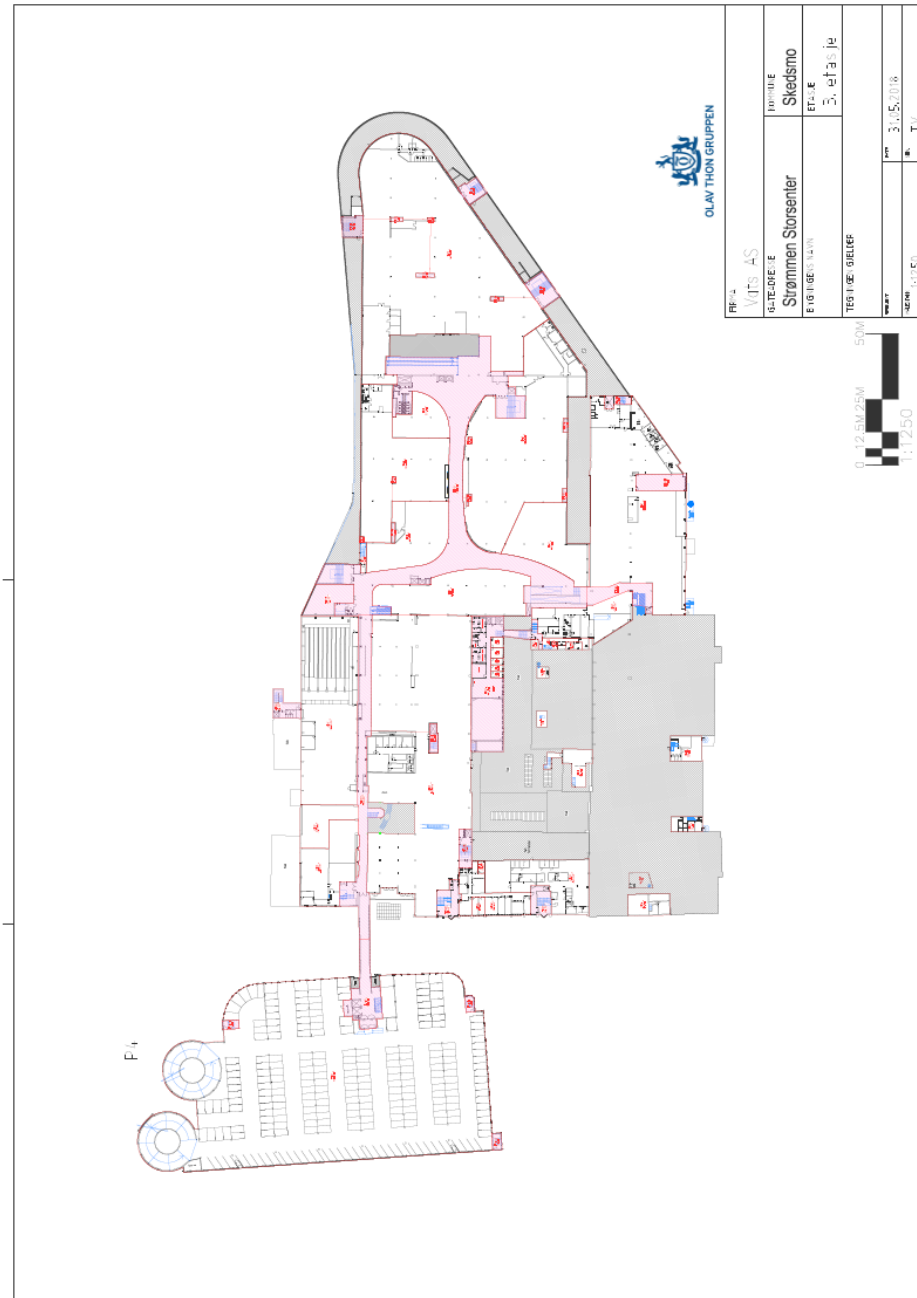
Figur B.1: Plantegning 1. etasje

B.2 2. etasje



Figur B.2: Plantegning 2. etasje

B.3 2. etasje

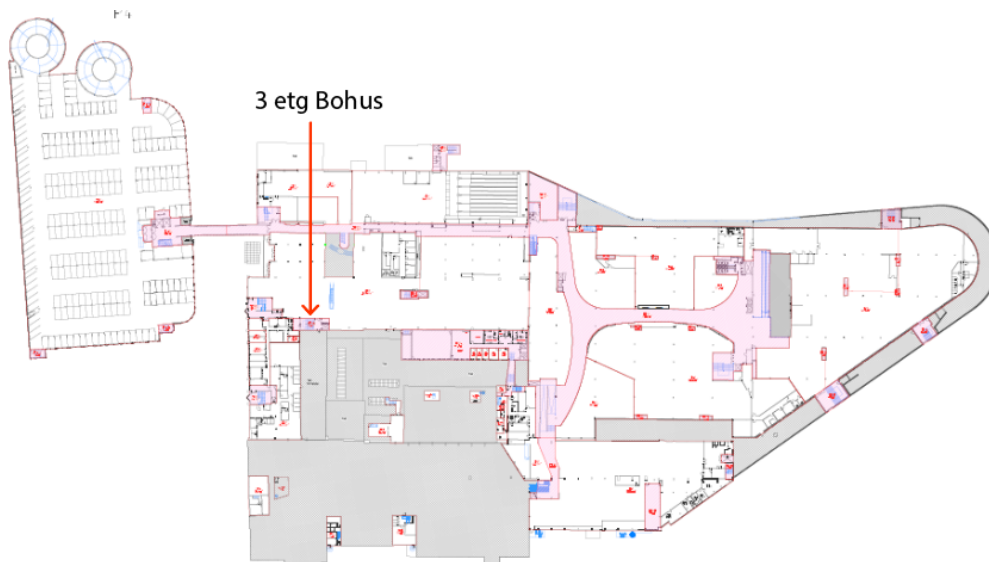
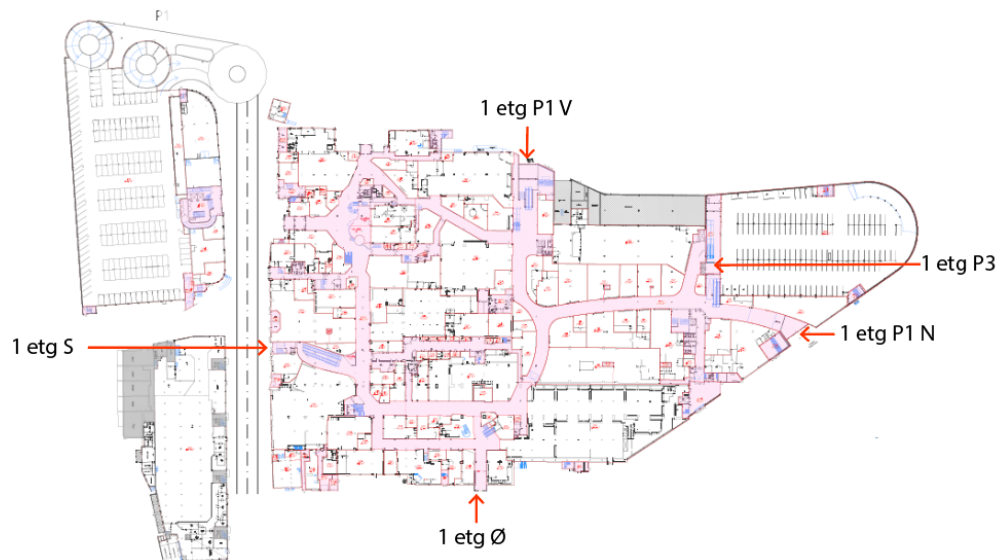


Figur B.3: Plantegning 3. etasje

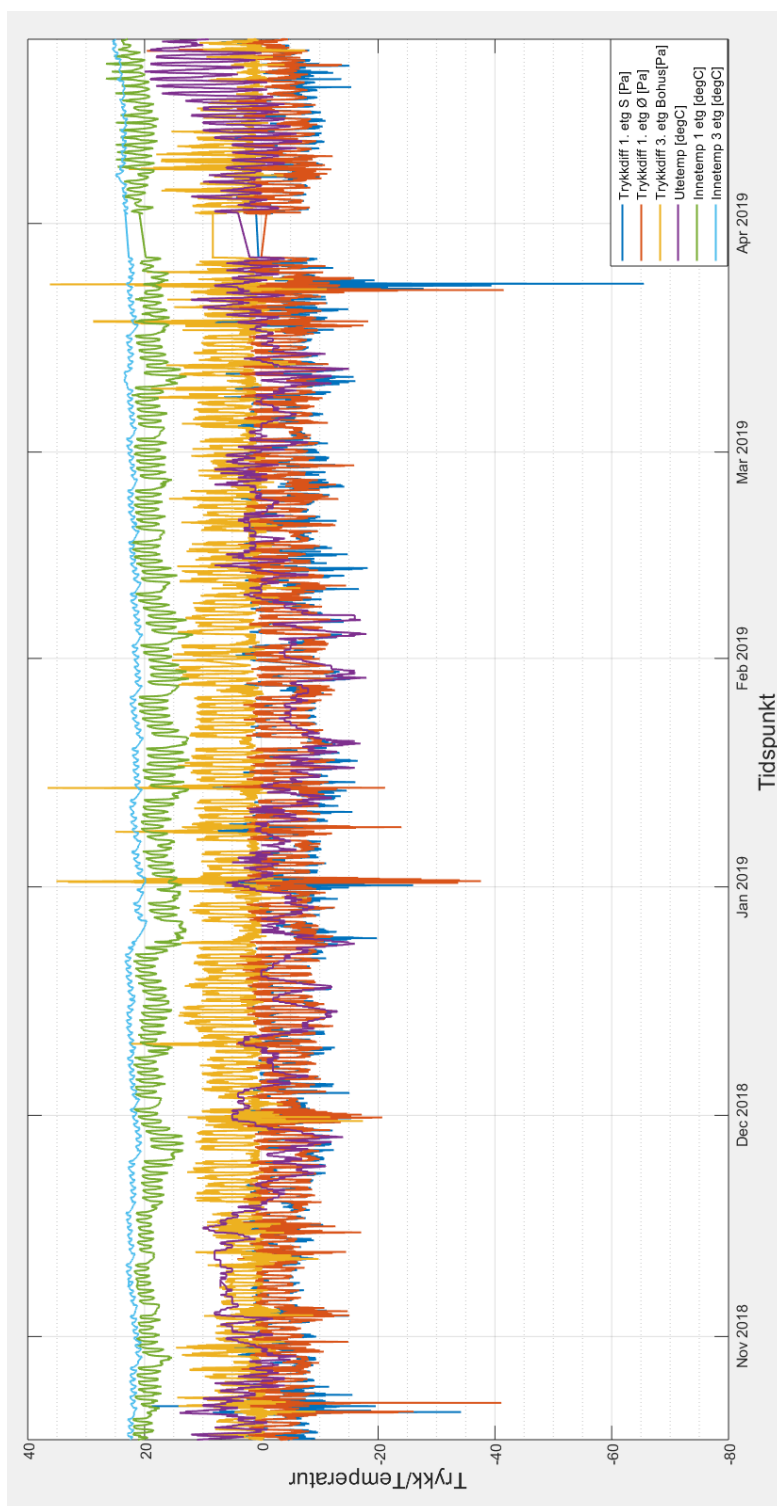
C Airtight

C.1 Airtight målepunkter

Plantegningene viser plassering av sensorer i 1. og 3. etasje ved Strømmen storsenter. Sensorene er plassert ca. 3m over bakken og i nærheten av innganger i 1. etasje.

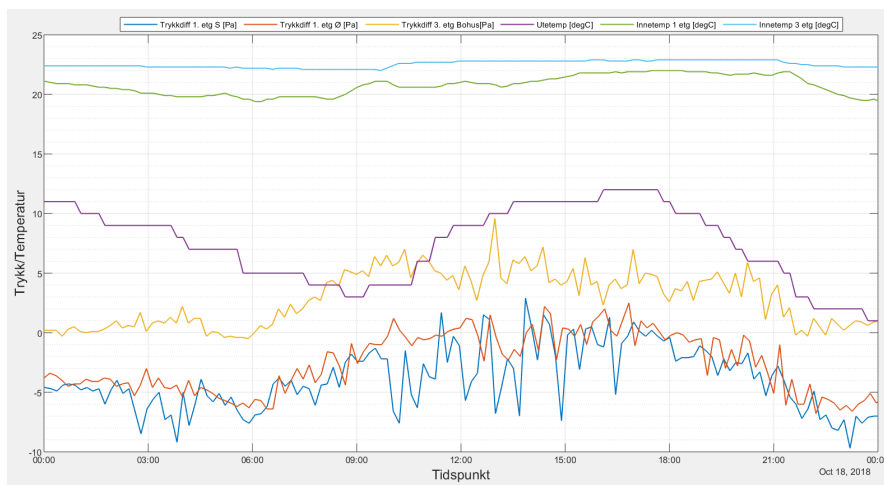


C.2 Airtight måleresultat hele perioden

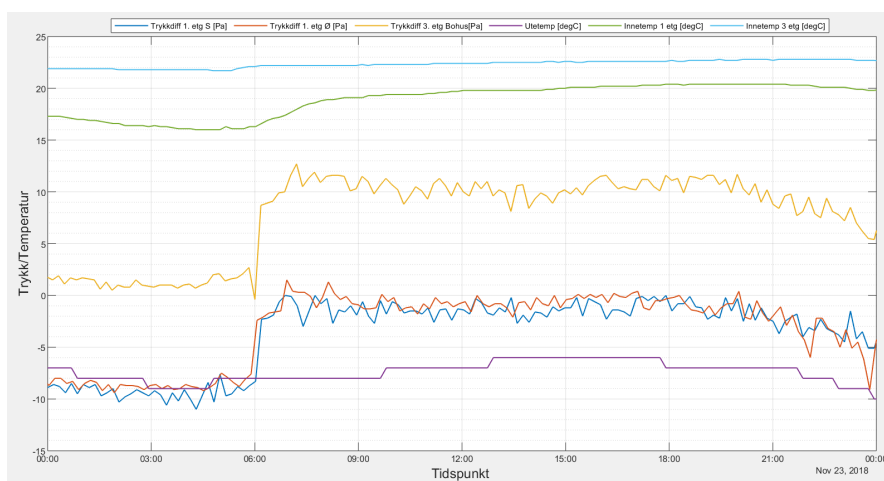


Figur C.1: Airtight trykk- og temperaturmålinger for hele måleperioden, 18.10.2018 - 26.04.2019. Viser differansen trykket mellom inne og ute i 1. og 3. etasje, innetemperatur i 1. og 3. etasje og utetemperatur. Det er et opphold i måledata fra 27.03.19 - 02.04.19.

C.3 Airtight måleresultat 18. oktober og 23. november



Figur C.2: Airtight trykk- og temperaturmålinger for 18. oktober 2018. Viser differansen trykket mellom inne og ute i 1. og 3. etasje, innetemperatur i 1. og 3. etasje og utetemperatur.

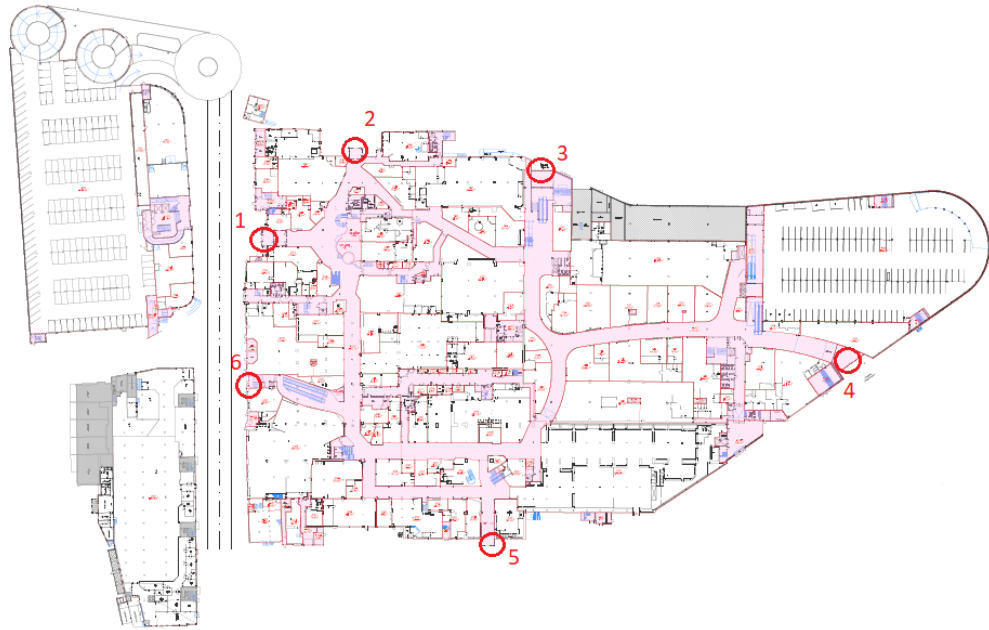


Figur C.3: Airtight trykk- og temperaturmålinger for 23. november 2018. Viser differansen trykket mellom inne og ute i 1. og 3. etasje, innetemperatur i 1. og 3. etasje og utetemperatur.

D Feltnmålinger

D.1 Målepunkter

Figur D.1 viser målepunktene for måling av lufthastighet og temperatur gjennom seks innganger i 1. etasje ved Strømmen storsenter.



Figur D.1: Målepunkter for lufthastighet og temperatur i innganger i 1. etasje.

D.2 Måleresultat

Tabellen nedenfor viser måleresultat fra feltmålinger utført ved Strømmen storsenter 27.03.2019. Tabell 1 viser Lufthastighet og temperaturmålinger ved seks innganger i 1. etasje, målt mellom 08:00-09:30. Målingene er utført før ventilasjonen i bygget skrues på. Tabell 2 viser tilsvarende, målt mellom 11:00-13:00 og etter ventilasjon er skrudd på. Tabell 3 viser lufttemperatur målt ved to steder i 1-3 etasje. Måling av temperatur er utført på formiddagen (10:00-10:30) og ettermiddagen (15:30-16:00). Målingene ved vurdert som ikke pålitelige, og derfor ikke vurdert i oppgaven.

	Lufthastighet [m/s]		Retning lufthastighet		Temperatur [°C]	
	Lukket	Åpen	Undertrykk	Overtrykk	Lukket	Åpen
1 etasje	1	0,011	0,065	x	17,5	7,5
	2	0,001	0,045	x	12,5	10,5
	3	0	0,012	x	19,4	17,2
	4	0,013	0,053	x	15,9	14,1
	5	0	0,033	x	20	21,3
	6	Utilgjengelig	Utilgjengelig	Utilgjengelig	Utilgjengelig	Utilgjengelig

	Lufthastighet [m/s]		Retning lufthastighet		Temperatur [°C]	
	Lukket	Åpen	Undertrykk	Overtrykk	Lukket	Åpen
1 etasje	1	0,011	0,065	x	17,5	7,5
	2	0,001	0,045	x	12,5	10,5
	3	0	0,012	x	19,4	17,2
	4	0,013	0,053	x	15,9	14,1
	5	0	0,033	x	20	21,3
	6	Utilgjengelig	Utilgjengelig	Utilgjengelig	Utilgjengelig	Utilgjengelig

		Temperatur[°C]	
		10:00-10:30	15:30-16:00
1 etasje	Vest i bygget	22,6	21,7
	Øst i bygget	18,7	20,7
2 etasje	Vest i bygget	22,8	22,7
	Øst i bygget	21,7	22,2
3 etasje	Vest i bygget	22,9	22,2
	Øst i bygget	22,2	22,4

E IDA ICE

E.1 Simuleringsspråk

Forklaring av IDA ICE simuleringsspråk som benyttet i simulering er gitt under. [10].

Abstract	A brief textual description of the model
Equations	The actual mathematical description (formalized according to a strict syntax but quite readable also for humans)
Links/Interfaces	A description of the ports or terminals of the component. A fan would typically have at least two links for incoming and outgoing air flow and could also have links for power supply and control signals.
Variables	Variables to be calculated by the model.
Parameters	Quantities that characterize the component, e.g. a vector of numbers describing the fan curve.
Parameter processing	Computer code which converts user supplied parameters into those that actually appear in the equations

E.2 Klimamodell

Tabell E.1: Klimamodellen i IDA ICE beregner og leverer følgende data [10]. Modellen er en algoritmisk modell med input og output.

Description	Name IDA ICE
Air temperature [°C]	Tair
Sky temperature [°C]	Tsky
Ground temperature [°C]	Tground
Air humidity ratio [kg H2O/ kg dry air]	HumAir
Air pressure [Pa]	Pair
CO2 -fraction [μ g /kg dry air]	Xair
Direct normal solar radiation [W/m ²]	IDirNorm
Diffuse horizontal solar radiation [W/m ²]	IDiffHor
Wind direction [°]	WindDir
Wind velocity [°]	WindVel
Elevation angle of the sun [°]	ElevSun
Azimuth angle of the sun [°]	AzimutSun

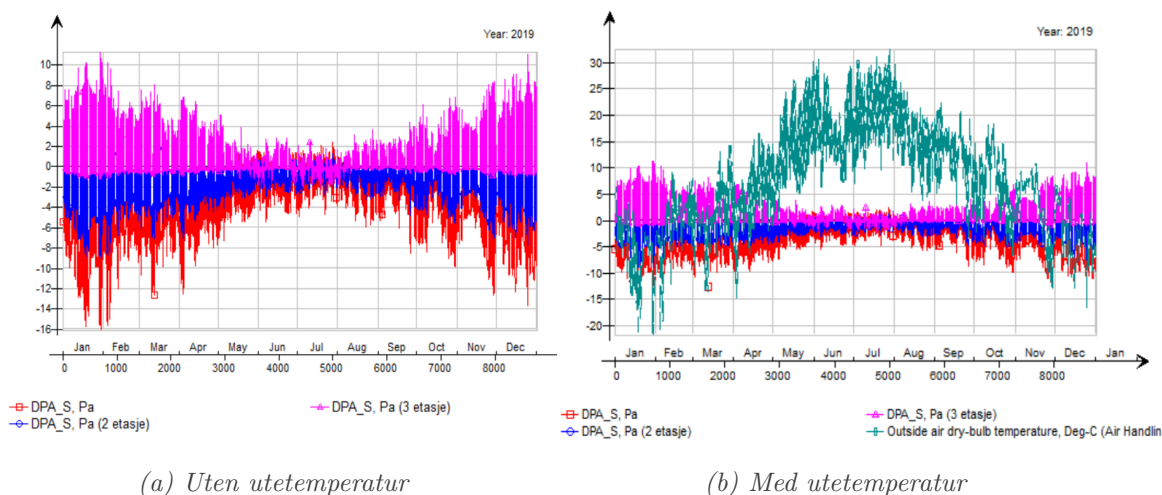
E.3 IDA ICE klimadata

	Variables					
	Dry-bulb temperature, Deg-C	Rel humidity of air, %	Direction of wind, Deg	Speed of meteorological wind, m/s	Direct normal rad, W/m ²	Diffuse rad on hor surf, W/m ²
January	-6.2	87.9	186.5	1.9	59.0	9.0
February	-0.9	89.4	177.2	1.7	103.7	24.2
March	1.3	77.7	178.3	2.6	154.3	51.1
April	4.4	73.1	173.1	2.1	133.3	87.8
May	15.0	63.4	174.5	2.5	201.1	115.2
June	17.5	58.2	166.7	3.1	183.2	133.6
July	21.2	58.0	162.8	2.6	185.5	125.4
August	15.8	76.0	200.4	2.3	152.8	100.7
September	12.2	75.8	190.4	2.9	121.1	65.3
October	6.6	83.0	178.9	2.3	101.2	32.8
November	2.5	94.4	166.5	1.9	63.2	13.4
December	-2.7	93.1	175.9	1.8	37.4	6.3
mean	7.3	77.4	177.6	2.3	124.8	63.9
mean*8760.0 h	63694.4	678380.5	1556157.5	20296.1	1093392.0	560120.0
min	-6.2	58.0	162.8	1.7	37.4	6.3
max	21.2	94.4	200.4	3.1	201.1	133.6

Figur E.1: Rapport fra klimadata benyttet i IDA ICE.

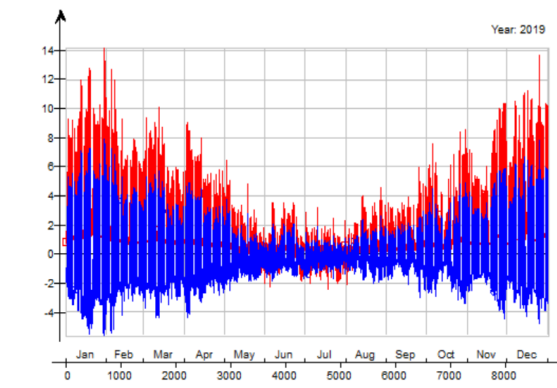
E.4 Trykkforhold 2019

Figur E.2 viser differansetrykket mellom inne og ute i 1, 2 og 3 etasje, fra januar-desember 2019. Figuren viser med og uten utetemperatur. Som det fremkommer av figur E.2 vil trykkforskjellen mellom etasjene være vesentlig større om vinteren enn om sommeren. Øverst i bygget kan det om vinteren bli et overtrykk opp mot 10 Pa. Nederst i bygget kan det om vinteren bli et undertrykk ned mot 15 Pa. Nøytralplanet ($\Delta Pa=0$) ligger i 3. etasje, tilsvarende nøytralplanet fra airtight trykkmålinger.



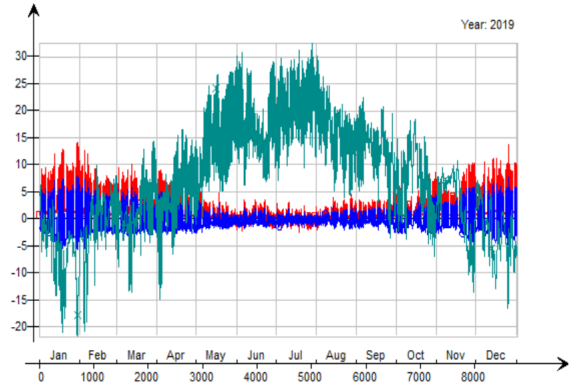
Figur E.2: Trykkforhold [Pa] i 1, 2 og 3 etasje 01.01.2019-31.12.2019. Rosa: 1. etasje. Blå: 2. etasje. Rød: 3. etasje. Grønn: utetemperatur.

Figur E.3 viser hvordan differansetrykket mellom inne og ute i glasstak 1 og 2, fra januar-desember 2019. Figuren viser med og uten utetemperatur. Som det fremkommer av figur E.3 vil trykkforskjellen i glasstakene være vesentlig større om vinteren enn om sommeren. I glasstak 1 varierer trykket gjennom året mellom 12Pa og -2Pa. I glasstak 2 varierer trykket gjennom året mellom 6Pa og -5Pa. Som nevnt ligger nøytralplanet i 3. etasje. Dette medfører at glasstak 1 (ligger over nøytralplan) har overtrykk gjennom store deler av året. Glasstak 2 ligger ved nøytralplan og vil variere mellom undertrykk og overtrykk.



—□— DPA_S, Pa
—○— DPA_S, Pa (Glasstak 2)

(a) Uten utetemperatur



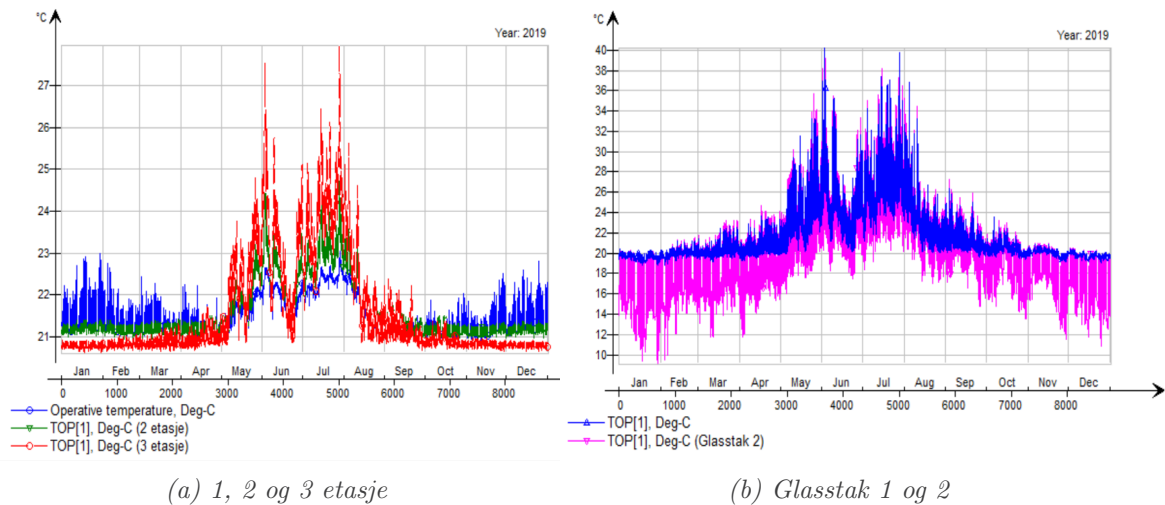
—□— DPA_S, Pa
—○— DPA_S, Pa (Glasstak 2)
 —x— Outside air dry-bulb temperature, Deg-C (Air Hanc)

(b) Med utetemperatur

Figur E.3: Trykkforhold [Pa] i glasstak 1 og 2, 01.01.2019-31.12.2019. Rød: glasstak 1. Blå: glasstak 2. Grønn: utetemperatur.

E.5 Temperaturforhold 2019

Figur E.4 viser hvordan operativ temperatur [$^{\circ}\text{C}$] varierer gjennom året i 1, 2 og 3 etasje og glasstak 1 og 2. Resultatet viser store forskjeller vertikalt i bygget og gjennom året. Figur E.4a viser operativ temperatur i 1, 2 og 3 etasje gjennom året. På vinteren er det varmest nederst i bygget. På sommeren er det varmest øverst i bygget. Figur E.4b viser operativ temperatur i glasstak 1 og 2 gjennom året. Resultatet viser at det kan bli høye temperaturer om sommeren i både glasstak 1 og 2, mens det på vinteren blir kaldt kun i glasstak 2. Operativ temperatur i glasstak 2 om sommeren kommer ikke tydelig frem i diagrammet fordi det ligger bak glasstak 1.



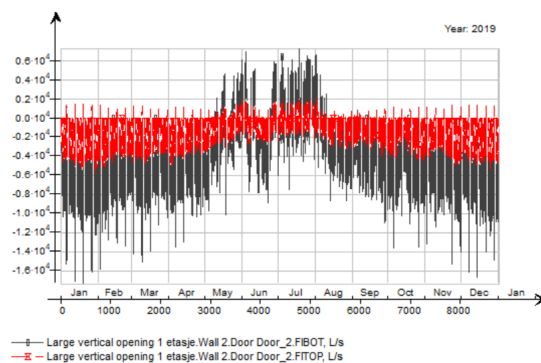
Figur E.4: Operativ temperatur [$^{\circ}\text{C}$] i 1-3 etasje og glasstak 1 og 2 01.01.2019-31.12.2019.

a) Blå: 1. etasje. Grønn: 2. etasje. Rød: 3. etasje.

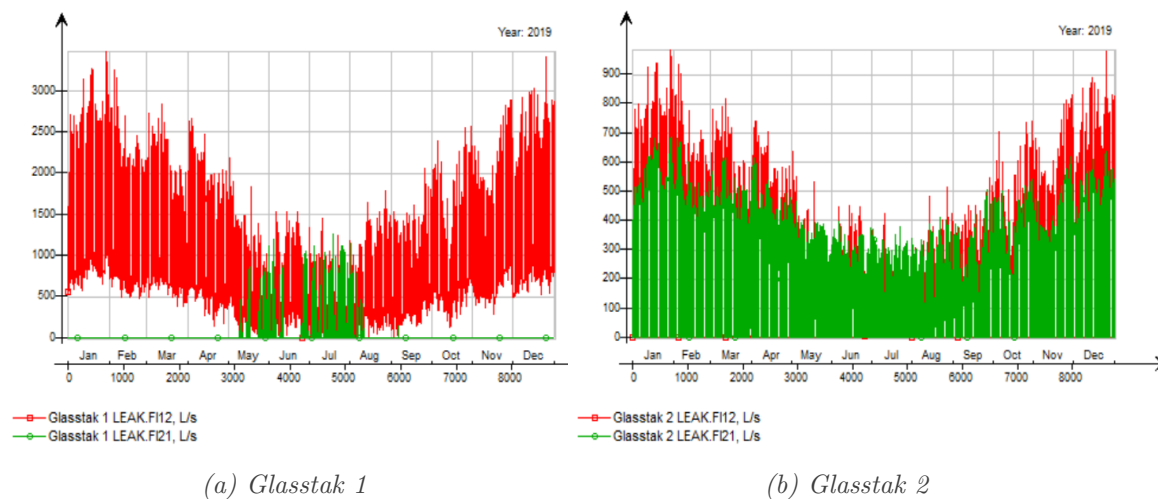
b) Blå: glasstak 1. Rosa: glasstak 2.

E.6 Luftstrømmer 2019

Figur E.5 viser luftstrøm gjennom inngangsdør i 1. etasje gjennom hele 2019. Figur E.6 viser luftstrøm gjennom lekkasjer i glasstak 1 og 2 gjennom hele 2019. Luften vil bevege seg inne gjennom døren om vinteren og både inn og ut av døren om sommeren. Luft gjennom lekkasjer i glasstak 1 vil forekomme som eksfiltrasjon store deler av året, og både eksfiltrasjon og infiltrasjon om sommeren. Luft gjennom lekkasjer i glasstak 2 vil bevege seg både som eksfiltrasjon og infiltrasjon gjennom hele året.

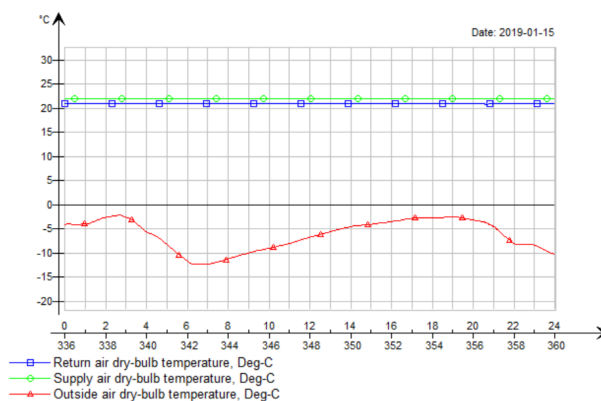


Figur E.5: Luftstrøm [l/s] gjennom inngangsdør i 1. etasje. Rød: bunnen av døren. Svart: toppen av døren.

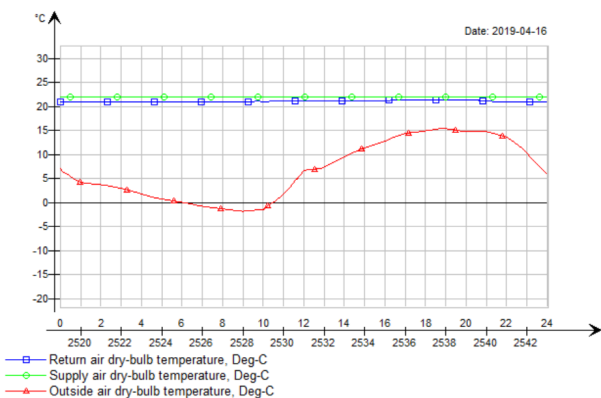


Figur E.6: Luftstrøm [l/s] gjennom glasstak 1 og 2. Rød: eksfiltrasjon/ut. Grønn: infiltrasjon/inn.

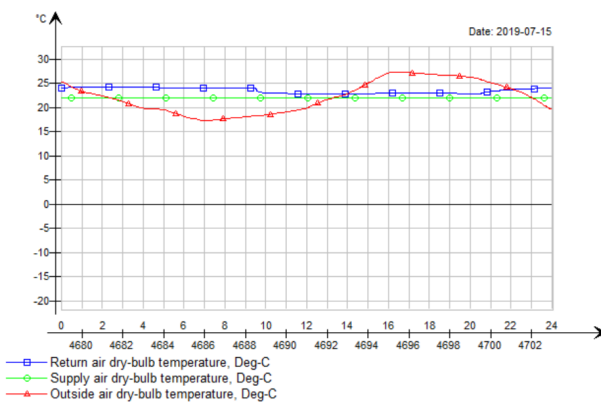
E.7 Temperatur IDA ICE: tilluft, avtrekk og ute



(a) 15. januar 2019



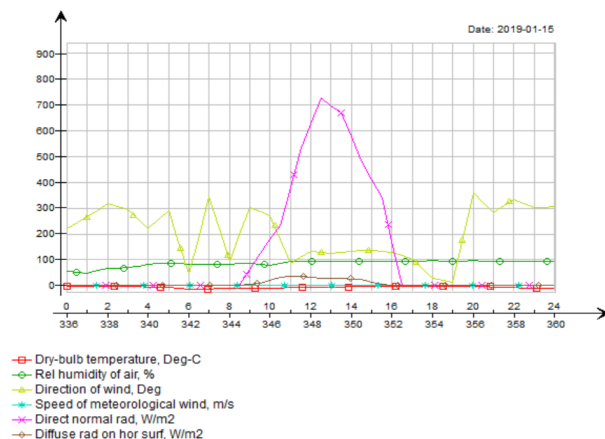
(b) 16. april 2019



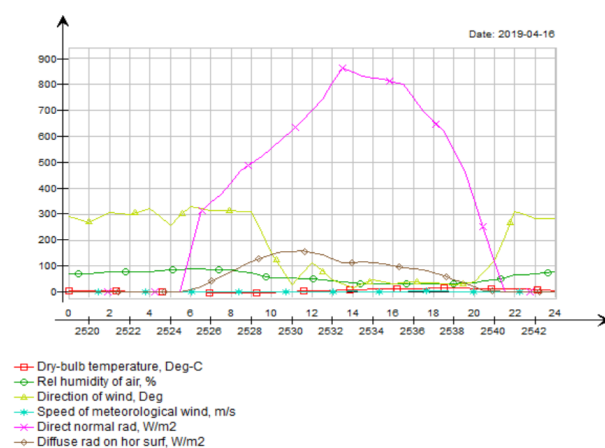
(c) 15. juli 2019

Figur E.7: Tilluftstemperatur, avtrekkstemperatur og utetemperatur for 15. januar, 16. april og 15. juli 2019.

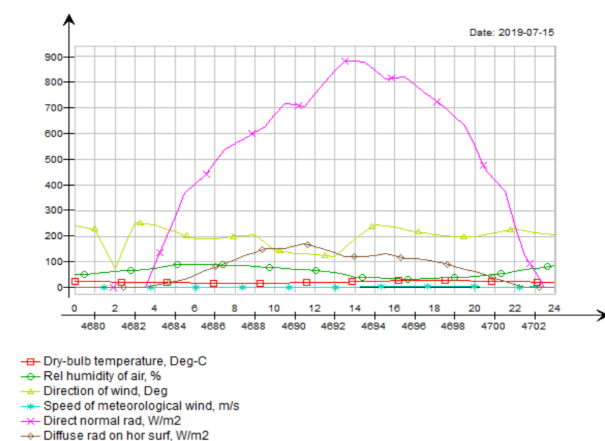
E.8 Klimadata IDA ICE



(a) 15. januar 2019



(b) 16. april 2019



(c) 15. juli 2019

Figur E.8: Klimadata for 15. januar, 16. april og 15. juli 2019. 15. januar er solinnstråling opp mot 700 W/m². 16. april er solinnstråling opp mot 850 W/m². 15. juli er solinnstråling opp mot 900 W/m².