



OPPGAVE/KANDIDATNR:	6
TILGJENGELIGHET:	Åpen

OSLO METROPOLITAN UNIVERSITY
STORBYUNIVERSITETET

Institutt for bygg- og energiteknikk

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

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Telefon: 67 23 50 00

www.oslomet.no

Masteroppgave

MASTEROPPGAVENS TITTEL Trykkforholds påvirkning på energibehov og termisk komfort ved Strømmen Storsenter	DATO 30. mai 2019
	ANTALL SIDER: 8 + 44 ANTALL SIDER VEDLEGG: 14
FORFATTER Toril Grødem Kleven	VEILEDER Ida Bryn

SAMMENDRAG

Denne masteroppgaven er utført i samarbeid med Olav Thon gruppen og Erichsen og Horgen, og ser på energibehov i forbindelse med lekkasjer og trykkforhold på Strømmen Storsenter. I sammenheng med oppgaven er det gitt tilgang på måledata fra en ekstern bedrift, Airtight, som kontinuerlig måler bl.a. trykkforskjeller i bygget. Det er blitt satt opp en forenklet modell i IDA ICE, som tar for seg fellesområdene i bygget. Deretter er det blitt gjort fire forskjellige simuleringer:

S1: Dagens situasjon

S2: Dagens bygg, men med balansert ventilasjon

S3: Tiltak med tett tak, med ventilasjon som i dag

S4: Tiltak med tett tak og balansert ventilasjon

Det konkluderes med at S4 er det beste alternativet for energibesparelse, som vil gi et årlig redusert energibehov på 939374,1 kWh.

3 STIKKORD

Trykkforskjell

Lekkasjer

Ventilasjon

Forord

Denne oppgaven er det avsluttende arbeidet for mastergraden min, ved OsloMet - Storbyuniversitetet, Institutt for bygg- og energiteknikk. Oppgaven har vært utfordrende og har ført til at jeg har lært mye nytt det siste halvåret.

Jeg vil gi en spesiell takk til veilederen min, Ida, som har gitt gode råd og masse motivasjon, og stilt de rette spørsmålene for å lede meg på riktig spor når ting har kjørt seg fast. Takk til Olav Thon Gruppen, og spesielt Ole ved Strømmen Storsenter, som uten å nøle besvarte alle spørsmål jeg måtte ha angående senteret. Takk til Per Magne og Bjørnar i Airtight, for tilgang på deres målinger. Takk til Erichsen Horgen, for tilgang til utstyr, mat og lån av kontorplass. Takk til Pernille, som har vært en fantastisk sparingspartner, og bidratt til god stemning på kontoret. Takk til min samboer, Aleksander, for hjelp og støtte gjennom arbeidet med oppgaven.

Toril Grødem Kleven

Oslo, 30. mai 2019

Sammendrag

Denne masteroppgaven er utført i samarbeid med Olav Thon gruppen og Erichsen og Horgen, og ser på energibehov i forbindelse med lekkasjer og trykkforhold på Strømmen Storsenter. I forbindelse med oppgaven er det gitt tilgang på måledata fra en ekstern bedrift, Airtight, som kontinuerlig måler bl.a. trykkforskjeller i bygget. Det er blitt satt opp en forenklet modell i IDA ICE, som tar for seg fellesområdene i bygget. Deretter er det blitt gjort fire forskjellige simuleringer:

S1: Dagens situasjon

S2: Dagens bygg, men med balansert ventilasjon

S3: Tiltak med tett tak, med ventilasjon som i dag

S4: Tiltak med tett tak og balansert ventilasjon

Resultatene fra S1 ble sammenlignet med målingene fra Airtight for å verifisere modellen til bruk i de videre simuleringene. Resultatene fra de forskjellige simuleringene tar for seg trykkforskjeller, energibehov for romoppvarming og ventilasjonsoppvarming, og luftstrømmer gjennom inngangene. Det viser seg at tetting av tak vil øke trykket i bygget og redusere energibehovet. Det konkluderes med at S4 er det beste alternativet for energibesparelse, som vil gi et årlig redusert energibehov på 939374,1 kWh.

Abstract

This master's thesis is done in collaboration with Olav Thon Gruppen and Erichsen Horgen, and considers energy demands associated with leaks and pressure differences at Strømmen Storsenter. Access has been provided on measurement data from an external company, Airtight, which continuously measures different parameters, e.g. pressure differences. A simplified model has been set up in IDA ICE, which consists of the public areas in the building. Then four different situations have been simulated:

S1: Today's situation

S2: Today's building, but with balanced ventilation

S3: Measures with a sealed roof, with ventilation as today

S4: Measures with a sealed roof, with balanced ventilation

The results from S1 were compared with the measurements from Airtight to verify the model for use in the further simulations. The results of the various simulations illustrates pressure differences, energy requirements for space heating and ventilation heating, and air flows through the entrances. It turns out that sealing the roof will increase the pressure in the building and reduce the energy requirement. It is concluded that S4 is the best alternative for energy saving, which will result in an annual reduced energy demand of 939374.1 kWh.

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Hensikt	1
2	Problemstilling og hypotese	2
3	Teori	3
3.1	Infiltrasjon og trykkforskjeller	3
3.2	Trykkstyring med ventilasjon	7
3.2.1	Varmegjenvinning	7
3.3	Luftstrøm gjennom dører	9
3.4	Beregningsmodeller i IDA ICE	10
4	Metode	13
4.1	Strømmen Storsenter	13
4.2	Data fra Airtight	13
4.3	IDA ICE	15
4.3.1	Klimadata	15
4.3.2	Oppbygning av grunnmodell	16
4.3.3	S1: Simulering av dagens situasjon	20
4.3.4	S2: Simulering av dagens bygg med balansert ventilasjon	24
4.3.5	S3: Simulering av tiltak hvor tak tettes, ventilasjon som i dag	24
4.3.6	S4: Simulering av tiltak med tett takk og balansert ventilasjon	24
5	Resultater	25
5.1	S1: Dagens situasjon	25
5.1.1	Sammenligning av trykkforhold med Airtight-målinger (verifisering av modell)	25
5.1.2	Energibehov, dagens situasjon	28
5.1.3	Luftstrømmer gjennom dører, dagens situasjon	28
5.2	S2: Balansert ventilasjon	30
5.2.1	Trykkforhold ved balansert ventilasjon	31
5.2.2	Energiforbruk ved balansert ventilasjon	31

5.2.3	Luftstrømmer gjennom dører ved balansert ventilasjon	31
5.3	S3: Tiltak: Tetting av tak, ventilasjon som i dag	33
5.3.1	Trykkforhold etter tetting av tak	33
5.3.2	Energiforbruk etter tetting av tak	33
5.3.3	Luftstrømmer gjennom dører ved tetting av tak	34
5.4	S4: Tiltak: Tetting av tak, balansert ventilasjon	36
5.4.1	Trykkforhold ved tett tak og balansert ventilasjon	36
5.4.2	Energiforbruk ved tett tak og balansert ventilasjon	36
5.4.3	Luftstrømmer gjennom dører ved tett tak og balansert ventilasjon	36
6	Diskusjon	38
7	Konklusjon	41
A	Plantegninger av Strømmen Storsenter	A1
B	Totale passeringer gjennom inngangene	A3
C	Resultater fra simuleringer med lavere luftmengde	A4
C.1	Dagens situasjon	A4
C.2	Balansert ventilasjon	A7
C.3	Tiltak: Tetting av tak, samme ventilasjon	A9
C.4	Tiltak: Tetting av tak, balansert ventilasjon	A11
D	Resultater ved bruk av for lav tilluftstemperatur	A13
D.1	Trykkforhold	A13
D.2	Energibehov	A13
E	Trykkforhold 15. januar med balansert ventilasjon og lukkede dører	A14

Figurer

3.1	Nøytralplanet	4
3.2	Nøytralplanets plassering i et tilfelle med kun en åpning.	5
3.3	Skorsteinseffekten i et bygg hvor det er flere rom isolert fra hverandre. Figur hentet fra Byggforskserien, <i>Fukt i bygninger. Teorigrunnlag</i> [9]	6
3.4	Roterende varmegjenvinner. Figur hentet fra Byggforskserien, <i>Varmegjenvinnere i ventilasjonsanlegg</i> [6]	7
3.5	Varmegjenvinnerens plassering i forhold til vifter. Figur hentet fra Byggforskserien, <i>Varmegjenvinnere i ventilasjonsanlegg</i> [6]	8
4.1	Plassering av måleinstrumenter i 1. etasje	14
4.2	Plassering av måleinstrumenter i 3. etasje	15
4.3	Modellen i IDA ICE	17
4.4	Trykkforskjell målt av Airtight 6. januar 2019, når senteret er stengt og ventilasjonen avslått.	19
4.5	Trykkforskjell målt av Airtight 15. januar 2019	21
4.6	Dørenes åpningsareal over et døgn, hvor 0 = helt lukket, og 1 = helt åpen.	22
5.1	Trykkforskjell målt av Airtight 6. januar 2019	26
5.2	Trykkforskjell simulert i IDA ICE 6. januar 2019	26
5.3	Trykkforskjell målt av Airtight 15. januar 2019	27
5.4	Trykkforskjell simulert i IDA ICE 15. januar 2019	28
5.5	Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, dagens situasjon.	29
5.6	Luftmengder inn gjennom en dør som står helt åpen, dagens situasjon.	30
5.7	Trykkforhold ved balansert ventilasjon.	31
5.8	Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved balansert ventilasjon.	32
5.9	Luftmengder gjennom en dør som står helt åpen, ved balansert ventilasjon.	32
5.10	Trykkforskjell ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.	33
5.11	Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.	34
5.12	Luftmengder gjennom en dør som står helt åpen, ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.	35
5.13	Trykkforskjell ved tetting av tak og balansert ventilasjon.	36
5.14	Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved tetting av tak og balansert ventilasjon.	37

5.15	Luftmengder gjennom èn dør som står helt åpen, ved tetting av tak og balansert ventilasjon.	37
6.1	Energibehovet for hver simulerte situasjon, delt opp i post.	39
6.2	Energibehovet for hver simulerte situasjon, stablet	39
A.1	Plantegning, 1 etasje Strømmen Storsenter	A1
A.2	Plantegning, 2 etasje Strømmen Storsenter	A1
A.3	Plantegning, 3 etasje Strømmen Storsenter	A2
C.1	Trykkforskjell simulert i IDA ICE 6. januar 2019	A4
C.2	Trykkforskjell simulert i IDA ICE 15. januar 2019	A5
C.3	Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, dagens situasjon.	A6
C.4	Luftmengder inn gjennom èn dør som står helt åpen, dagens situasjon.	A6
C.5	Trykkforhold ved balansert ventilasjon.	A7
C.6	Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved balansert ventilasjon.	A8
C.7	Luftmengder gjennom èn dør som står helt åpen, ved balansert ventilasjon.	A8
C.8	Trykkforskjell ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.	A9
C.9	Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.	A10
C.10	Luftmengder gjennom èn dør som står helt åpen, ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.	A10
C.11	Trykkforskjell ved tetting av tak og balansert ventilasjon.	A11
C.12	Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved tetting av tak og balansert ventilasjon.	A12
C.13	Luftmengder gjennom èn dør som står helt åpen, ved tetting av tak og balansert ventilasjon.	A12
D.1	Trykkforhold ved for lav tilluftstemperatur (18°C) 15. januar 2019.	A13
E.1	Trykkforhold ved balansert ventilasjon og lukkede dører 15. januar 2019.	A14

Tabeller

4.1	Parametere som blir logget i Airtights målinger.	13
4.2	Forhold mellom fellesarealer og totale oppvarmede arealer, og resulterende luftmengder brukt i simulering.	16
4.3	Verdier brukt til grunnmodell i IDA ICE.	18
4.4	Lekkasjearaler simulert i IDA ICE, utenfor åpningstid.	20
4.5	Lekkasjearaler simulert i IDA ICE, en dag hvor senteret holder åpent.	22
4.6	Inndata for ventilasjon i IDA ICE.	23
5.1	Glasstakenes lekkasjeareal, som resulterte i like trykkforhold som Airtightmålingene.	25
5.2	Ventilasjonsluftmengder for simulering av dagens situasjon, som resulterte i like trykkforhold som Airtight-målingene.	27
5.3	Energibehov, dagens situasjon.	28
5.4	Ventilasjonsluftmengder for simulering med balansert ventilasjon.	30
5.5	Energibehov, balansert ventilasjon.	31
5.6	Energibehov, tett tak og ventilasjon som i dag.	33
5.7	Energibehov, tett tak og balansert ventilasjon.	36
B.1	Totalt antall mennesker som passerte gjennom inngangene 15 januar 2019.	A3
C.1	Ventilasjonsluftmengder for simulering med ubalansert ventilasjon.	A4
C.2	Energibehov, dagens situasjon.	A5
C.3	Ventilasjonsluftmengder for simulering med balansert ventilasjon.	A7
C.4	Energibehov, balansert ventilasjon i dagens bygg.	A7
C.5	Energibehov ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.	A9
C.6	Energibehov ved tetting av tak og balansert ventilasjon.	A11
D.1	Energibehov bruk av for lav tilluftstemperatur (18°C)	A13

1 Introduksjon

Denne masteroppgaven er gjennomført og skrevet av Toril Grødem Kleven for Olav Thon Gruppen og Erichsen og Horgen, med Ida Bryn (Erichsen og Horgen og Oslo-Met) som veileder. Oppgaven teller 30 studiepoeng og er det avsluttende arbeidet for mastergraden.

1.1 Bakgrunn

Olav Thon Gruppen eier og forvalter i dag 88 kjøpesentre i Norge[2]. De er interessert i å kartlegge problemer tilknyttet til inngangspartier, for å kunne innføre energisparende tiltak. Oppgaven tar for seg Strømmen Storsenter og energiforbruk forårsaket av store trykkforskjeller. Olav Thon Gruppen har inngått avtale med en ekstern bedrift, Airtight, som har kartlagt trykkforskjellene for å kunne utbedre disse ved hjelp av overtrykk på ventilasjonsanlegget. Dette har de gjort ved å utplassere sensorer ved inngangene i bygget, som kontinuerlig logger data. Disse dataene er blitt brukt som sammenligningsgrunnlag i denne oppgaven.

1.2 Hensikt

Målet for oppgaven er å få en bedre forståelse av trykkforholdene i bygget. Dermed vil det være enklere å finne nødvendige løsninger for å bedre den termiske komforten og å redusere energiforbruket. Senteret benytter i dag varmeporter, som kun gir en marginal bedring for termisk komfort. Det er ønskelig å finne en løsning som tar tak i årsaken til luftstrømmene, som knyttes til trykkforskjeller i bygget.

2 Problemstilling og hypotese

Problemstilling

- Hvordan blir trykkforhold påvirket av luftlekkasjers arealer og plassering i bygget? Hvordan vil dette påvirke termisk komfort og energibruk?
- Hvordan kan ventilasjonssystemet påvirke trykkforhold?
- Hvor mye vil trykkutjevning ved struping av avtrekk redusere energiforbruket, samt bedre termisk komfort?
- Hvordan blir inngangene påvirket av ulike ventilasjonsforhold, og hvordan endrer dette seg ved et tett bygg?

Hypotese

Hypotesen er at et tettest mulig bygg vil være mest energibesparende, siden det uten lekkasjer ikke vil være behov for trykkutjevningstiltak.

3 Teori

3.1 Infiltrasjon og trykkforskjeller

Infiltrasjon er ukontrollerte og ofte uønskede luftstrømninger gjennom utettheter og åpninger i bygninger. Bruken av dører har stor innvirkning på infiltrasjonen i næringsbygg, da disse er mye i bruk. Luftlekkasjen gjennom åpninger kan beregnes med Formel 1[4]:

$$\dot{V} = C_d \times \Delta P^n \quad (1)$$

hvor:

\dot{V} er volumstrømmen [$\frac{m^3}{s}$]

C_d er lekkasje-koeffisienten [$\frac{m^3}{s \cdot Pa^n}$]

ΔP er trykkforskjellen [Pa]

n er en dimensjonsløs eksponent

Lekkasjekoeffisienten kan både være gitt per areal og per lengde, som definert i Formel 2 og 3:

$$C_{d,L} = \left[\frac{m^3}{m^2 \times s \times Pa^n} \right] \quad \rightarrow \dot{V} = C_{d,L} \times \Delta P^n \times L \quad (2)$$

$$C_{d,A} = \left[\frac{m^3}{m^2 \times s \times Pa^n} \right] \quad \rightarrow \dot{V} = C_{d,A} \times \Delta P^n \times A \quad (3)$$

Lekkasjekoeffisienten C_d er definert som forholdet mellom den faktiske og teoretiske strømmingen. Den faktiske strømmingen vil være mindre enn den teoretiske, da den tar hensyn til tap som følge av friksjon og åpningens utforming[5]. n vil ligge mellom 0,5 (turbulent strømming) og 1 (laminær strømming). I mindre sprekker eller ved lav lufthastighet vil strømmingen være laminær, mens den vil være turbulent i større åpninger som dører og vinduer[5]. Trykkforskjellen over åpningen er selve drivkraften til luftstrømmingen, og har direkte sammenheng med temperaturforskjellen. Dette vises ved Formel 4[10]:

$$\Delta P = \rho_0 \times \left(\frac{273}{T_u} - \frac{273}{T_i} \right) \times g \times z \quad (4)$$

hvor:

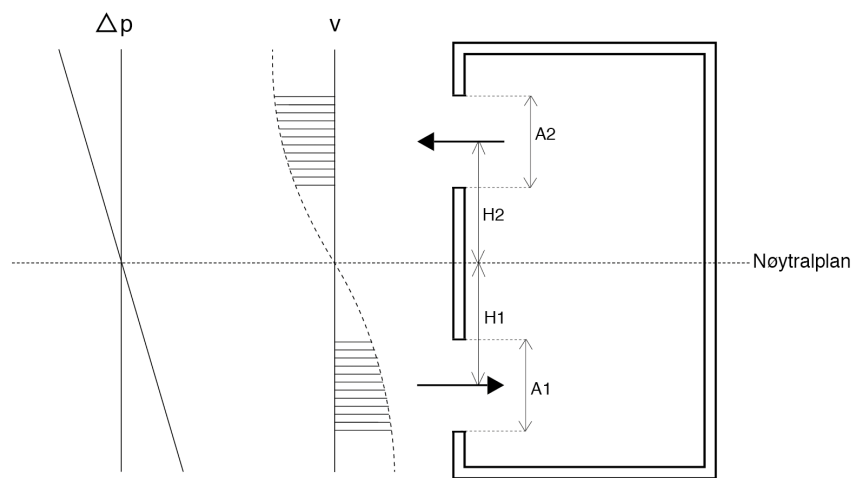
ρ_0 er luftens densitet ved 0°C [$\frac{kg}{m^3}$]

T_u er utetemperaturen [K]

T_i er innetemperaturen [K]

g er tyngdeakselerasjon [$\frac{m}{s^2}$]

z er den vertikale avstanden fra nøytralplanet [m]



Figur 3.1: Nøytralplanet

Nøytralplanet er det horisontale planet som krysser den vertikale akse der trykkforskjellen er lik 0. Dette planet vil være sentralt i denne rapporten, og kan si noe om hvor i bygget det er utettheter. Den vertikale avstanden til nøytralplanet er avgjørende for hvor stor trykkforskjell det er over klimaskjermen, og høyden til bygget er derfor en viktig faktor. Nøytralplanets plassering i bygget kan forklares ved Formel 5[10]:

$$H_1 = \frac{H}{1 + m} \quad m = \left(\frac{A_i}{A_u} \right)^2 \quad (5)$$

hvor:

H_1 er avstanden fra midten av A_i til nøytralplanet

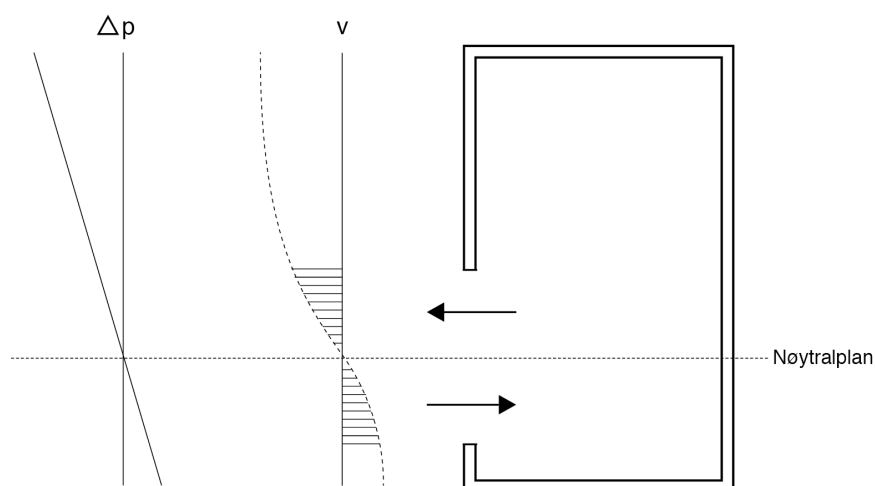
H er avstanden mellom midten av A_i og A_u

m er et forhåndsbestemt forholdstall

A_i er innløpsarealet, altså arealet på alle åpninger der det er undertrykk

A_u er utløpsarealet, altså arealet på alle åpninger der det er overtrykk

Som man ser er plasseringen av nøytralplanet gitt av forholdet mellom A_i og A_u , og vil alltid ligge et sted mellom eller i disse arealene. Den totale høyden til nøytralplanet vil være summen av H_1 og avstanden fra bakken til midten av A_i . Dersom A_i er uendelig stor i forhold til A_u , vil nøytralplanet ligge i midten av A_i , og omvendt. Forenklet kan alle lekkasjene i et område av bygget slås sammen til ett stort areal, som foreksempel lekkasjer i taket. Da vil man få en situasjon som ligner den vist i Figur 3.1, hvor A_1 er arealet til inngangsdørene, og A_2 er lekkasjer i taket. Dersom åpningen(e) i klimaskjermen flyttes vertikalt, vil trykkurven parallellforskyves. Dersom målet er et tett bygg, vil det være ideelt med et lavest mulig nøytralplan, da dette vil bety at A_u er veldig liten.

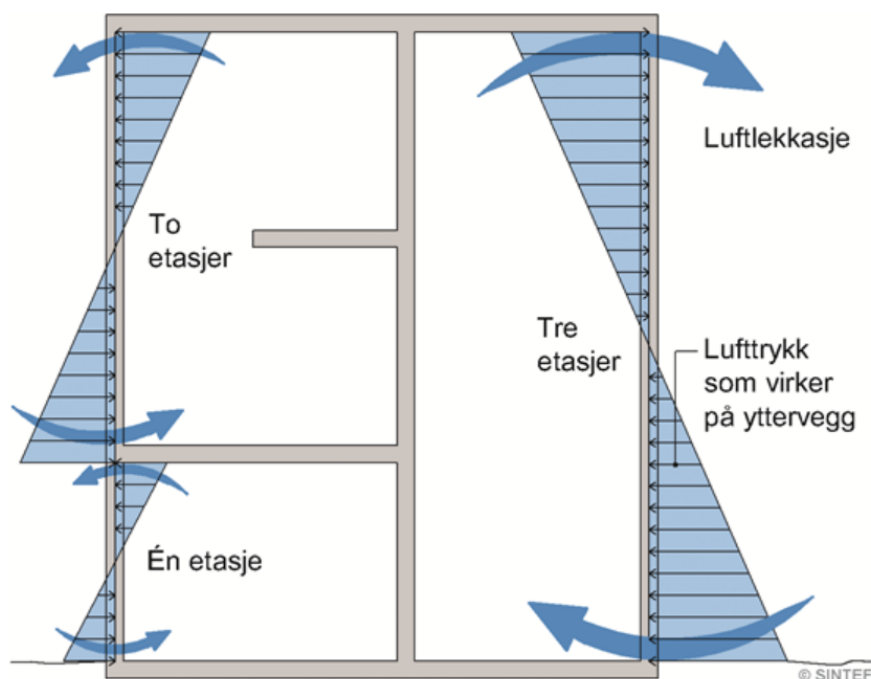


Figur 3.2: Nøytralplanets plassering i et tilfelle med kun en åpning.

Som vist i Figur 3.2 er $A_u=0$. Ved å bruke Formel 5 ser man at m vil gå mot uendelig, og dermed vil H_1 gå mot 0.

Nøytralplanet vil ikke være konstant. Plasseringen vil variere som følge av variasjon i åpningsarealer og trykkpåvirkning fra ventilasjon.

Skorsteinseffekten er betegnelsen på drivkraften som gjør at kald luft strømmer inn nederst i et bygg, og varm luft strømmer ut øverst. Den kalde luften nederst langs byggets fasade er tyngre enn inneluften, og det skapes et overtrykk på utsiden som presser luften inn. Dette skjer samtidig som at inneluften blir varmet opp, stiger til toppen av bygget, skaper overtrykk, og presser seg ut[9]. Det forutsettes at det er lekkasjer i bygget, og effekten blir større jo kaldere det er ute¹. På Figur 3.3 er skorsteinseffekten illustrert i et bygg med tre adskilte rom, hvor nøytralplanet ligger i midten av hvert rom. Det betyr at det er like store lekkasjer øverst og nederst i rommene, eller at de er jevnt fordelt over hele fasaden.



Figur 3.3: Skorsteinseffekten i et bygg hvor det er flere rom isolert fra hverandre. Figur hentet fra Byggforskserien, *Fukt i bygninger. Teorigrunnlag*[9]

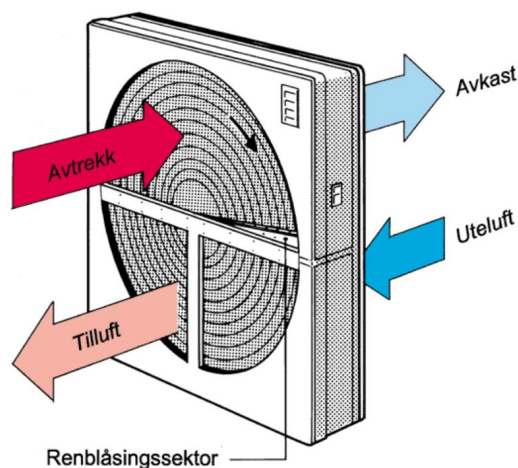
¹Om det er varmere ute enn inne, vil det omvendte skje, altså blir det undertrykk øverst i bygget og overtrykk nederst.

3.2 Trykkstyring med ventilasjon

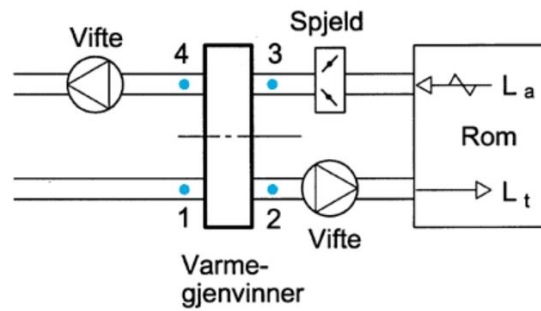
Med balansert ventilasjon er det like store luftmengder på tilluft og avtrekk. Ved å redusere avtrekksmengden i forhold til tilluft vil dette øke trykket i bygget. Nøytralplanet vil med dette senkes, og man kan redusere mengden kald luft som strømmer inn gjennom innganger nederst i bygget. Overtrykket i den øverste delen av bygget vil derimot bli større (se Formel 4), og uten tetting av eksisterende lekkasjer vil også luftmengdene gjennom disse følgelig bli større.

3.2.1 Varmegjenvinning

Senteret benytter seg av roterende varmegjenvinnere. Disse fungerer ved at en skive i metall med mange små kanaler roterer mellom tillufts- og avtrekkskanalen, som vist i Figur 3.4. Varmen fra avtrekksluften vil dermed regenereres, og blir tilført den kalde tilluften.



Figur 3.4: Roterende varmegjenvinner. Figur hentet fra Byggforskserien, *Varmegjenvinnere i ventilasjonsanlegg* [6]



Figur 3.5: Varmegjenvinnerens plassering i forhold til vifter. Figur hentet fra Byggforskserien, *Varmegjenvinnere i ventilasjonsanlegg* [6]

Virkningsgraden til varmegjenvinneren er gitt av Formel 6[6]:

$$\eta_t = \frac{L_t(t_2 - t_1)}{L_{min}(t_3 - t_1)} \quad (6)$$

hvor:

η_t er temperaturvirkningsgraden til varmegjenvinneren

L_t er tilluftsmengde [$\frac{m^3}{s}$]

L_{min} er den minste av tilluftsmengde og avtrekksmengde [$\frac{m^3}{s}$]

t_{1-3} er temperaturene ved punktene vist i Figur 3.5 [K]

Ved struping av avtrekk vil man miste energi man ellers ville brukt til varmegjenvinning av tilluft. Forutsetter man at virkningsgraden i systemet holdes konstant, kan man snu Formel 6 med hensyn på tilluftstemperaturen t_2 , og får Formel 7:

$$t_2 = t_1 + \frac{\eta_t \times L_{min}(t_3 - t_1)}{L_t} \quad (7)$$

Formel 7 viser at redusert avtrekksluftmengde gir redusert tilluftstemperatur. Det betyr at luften må varmes opp på andre måter. Mye av luften som inneholder energi som kunne vært gjenvunnet vil gå ut gjennom andre lekkasjer og åpninger istedet. Energien vil være produktet av effekt og tid, hvor effekten kan beregnes med Formel 8 [10]:

$$\Phi = \Delta L_{min} \times c_p \times \rho \times \Delta T \times \eta_t \quad (8)$$

hvor:

Φ er effekt (varmeeffekt) [W]

ΔL_{min} er forskjellen i L_{min} før og etter struping av avtrekk [$\frac{m^3}{s}$]

c_p er luftens spesifikke varmekapasitet [$\frac{J}{kg \cdot K}$]

ρ er massetettheten til luft [$\frac{kg}{m^3}$]

ΔT er temperaturforskjell mellom ute og inne [K]

3.3 Luftstrøm gjennom dører

For å kunne beregne luftstrømninger og nøytralplanets plassering i bygget, er en avhengig av å kjenne til åpningsarealene. Arealet vil variere med dørtype og åpningsfrekvens. På Strømmen er de fleste dørene skyvedører. Det er også noen konvensjonelle dører, men disse benyttes i så liten grad at de i denne rapporten neglisjeres.

I utgangspunktet beregnes luftstrømmer ved bruk av en lekkasjekoeffisient C_d som i Formel 1. For å kunne ta hensyn til dørtype og hvor mye døren blir brukt, byttes lekkasjekoeffisienten C_d ut med en luftstrømskoeffisient C_a . Luftstrømskoeffisientene som er brukt i denne rapporten er basert på en rapport fra ASHRAE[11], som tok for seg ulike dørers geometri, åpningsfrekvens og målinger av luftstrømmer. En masteroppgave brukte grafene fra den nevnte rapporten til å lage en formel som kan brukes til å beregne C_a [8] for en skyvedør med vindfang:

$$C_a = -4 \times 10^{-7} \times F_p^2 + 0,0008 \times F_p - 0,0024 \quad (9)$$

hvor:

F_p er antall mennesker i timen [PPH]

Lufthastighet Når luft eller annen væske passerer gjennom en åpning vil tverrsnittsarealet til luftstrømmen A_0 være gitt ved Formel 10[5]:

$$A_0 = A \times C_c \quad (10)$$

hvor:

A er arealet til åpningen [m^2]

C_c er kontraksjonskoeffisienten til åpningen

Kontraksjonskoeffisienten C_c er gitt av åpningens kantutforming, og varierer mellom 0,5 til 1. For skarpkantede åpninger vil den være rundt 0,6[5], og det er dette som vil gjelde for inngangene på Strømmen. Når volumstrømmen q_0 blir funnet via simuleringer, kan innløpshastigheten v_0 beregnes med Formel 11:

$$v_0 = \frac{q_0}{A_0} \quad (11)$$

3.4 Beregningsmodeller i IDA ICE

Inngangsdørene i bygget blir å betrakte som store vertikale åpninger i åpningstiden. For simulering av store vertikale åpninger mellom soner, eller mellom en sone og intiliggende miljø, bruker IDA ICE en beregningsmodell kalt CELVO. Denne tar hensyn til varierende trykkforskjell over åpningen, og beregner dette med Formel 12 ved bunnen av åpningen, og Formel 13 ved toppen[3]:

$$\Delta P_b = (P_1 - \rho_1 \times g \times z_{b1}) - (P_2 - \rho_2 \times g \times z_{b2}) \quad (12)$$

$$\Delta P_t = \Delta P_b - (\rho_1 \times g \times z_t + \rho_2 \times g \times z_t) \quad (13)$$

hvor:

P_1 og P_2 er trykket på referansenivå (bakken) [Pa]

ρ_1 og ρ_2 er massetetthet [$\frac{kg}{m^3}$]

g er tyngdeakselerasjon [$\frac{m}{s^2}$]

z_{b1} og z_{b2} er høyden fra referansenivå til bunn av åpningen [m]

z_t er høyden på åpningen [m]

Nøytralplanet plassering, beskrevet i Kap 3.1, beregnes med Formel 14[3]:

$$\Delta Z_n = \frac{\Delta P_b}{g \times (\rho_1 - \rho_2)} \quad (14)$$

For å beregne massestrømmen gjennom åpningen, introduseres det to hjelpevariabler, Topp og Bunn, vist i hhv. Formel 15 og Formel 16[3]:

$$T_{opp} = \frac{C_d \times \frac{2}{3} \times w \times |\Delta P_t|^{\frac{3}{2}}}{g \times (\rho_1 - \rho_2)} \quad (15)$$

$$B_{unn} = \frac{C_d \times \frac{2}{3} \times w \times |\Delta P_b|^{\frac{3}{2}}}{g \times (\rho_1 - \rho_2)} \quad (16)$$

hvor:

C_d er lekkasjekoeffisienten

w er bredden på åpningen [m]

Deretter følger forskjellige formler for massestrøm, avhengig av hvor nøytralplanet plassering. I tilfeller hvis nøytralplanet ligger *under* åpningen, benyttes Formel 17 og 18[3]:

$$\dot{m}_{12} = \begin{cases} 0 & \rho_1 > \rho_2 \\ (B_{unn} - T_{opp}) \times \sqrt{2\rho_1} & \rho_1 < \rho_2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\dot{m}_{21} = \begin{cases} (T_{opp} - B_{unn}) \times \sqrt{2\rho_2} & \rho_1 > \rho_2 \\ 0 & \rho_1 < \rho_2 \end{cases} \quad (18)$$

Hvis nøytralplanet er plassert *over* åpningen, benyttes Formel 19 og 20[3]:

$$\dot{m}_{12} = \begin{cases} 0 & \rho_1 < \rho_2 \\ (B_{unn} - T_{opp}) \times \sqrt{2\rho_1} & \rho_1 > \rho_2 \end{cases} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{21} = \begin{cases} (T_{opp} - B_{unn}) \times \sqrt{2\rho_2} & \rho_1 < \rho_2 \\ 0 & \rho_1 > \rho_2 \end{cases} \quad (20)$$

Det siste tilfellet er hvis nøytralplanet er plassert et sted *mellom toppen og bunnen* i åpningen. Da brukes Formel 21 og 22[3]:

$$\dot{m}_{12} = \begin{cases} Bunn \times \sqrt{2\rho_1} & \rho_1 > \rho_2 \\ -Topp \times \sqrt{2\rho_1} & \rho_1 < \rho_2 \end{cases} \quad (21)$$

$$\dot{m}_{21} = \begin{cases} Topp \times \sqrt{2\rho_2} & \rho_1 > \rho_2 \\ -Bunn \times \sqrt{2\rho_2} & \rho_1 < \rho_2 \end{cases} \quad (22)$$

Netto massestrøm beregnes med Formel 23[3]:

$$\dot{m} = \dot{m}_{12} - \dot{m}_{21} \quad (23)$$

4 Metode

4.1 Strømmen Storsenter

Denne rapporten kommer til å fokusere på fellesområdene i kjøpesenteret. Med fellesområder/arealer menes det alt oppvarmet areal som ikke disponeres av butikker eller er leid ut til annet formål. Fellesarealet har to glasstak, og store åpninger mellom etasjene slik at luften flyter fritt. I forbindelse med rapporten er størrelse på totale areal, oppvarmede areal og fellesareal blitt oppgitt av Olav Thon Gruppen. Med utgangspunkt i oppgitt fellesareal ble det som en forenkling estimert hvor stort areal som ligger i hver etasje. Første og andre etasje ble satt som like, og tredje etasje ble estimert til å være 80% av de andre etasjene. Plantegninger over Strømmen Storsenter ligger i Vedlegg A.

Av Olav Thon Gruppen ble det opplyst at ventilasjonen er på fra ca 9.45 til ca 20.30. Men på senteret er det mange aggregater, hvor mange har ulik driftstid. Derfor kan resultatene komme til å variere litt i forhold til når ventilasjonen slås på².

4.2 Data fra Airtight

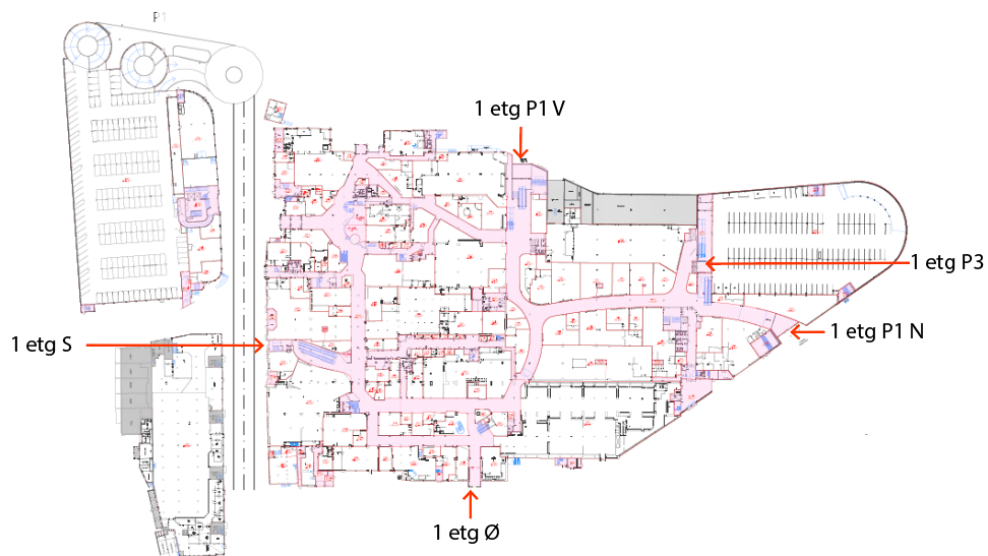
Airtight har siden midten av oktober 2018 gjort målinger for å kartlegge trykkforskjeller. I forbindelse med denne oppgaven er det blitt gitt tilgang til disse målingene. Tabell 4.1 viser hvilke målinger som er gjort og hvilken benevnning disse har.

Tabell 4.1: Parametere som blir logget i Airtights målinger.

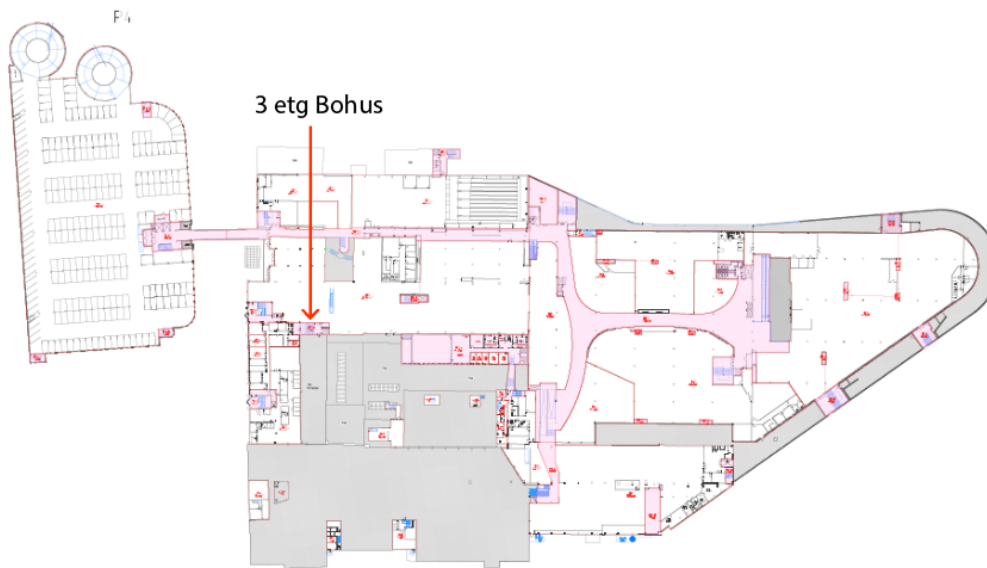
Verdi	Benevnning
Temperatur inne	°C
Temperatur ute	°C
Luftfuktighet inne	RF
Luftfuktighet ute	RF
Vindhastighet	$\frac{m}{s}$
Vindretning	°
Absolutt trykk inne	Pa
Trykkforskjell inne/ute	Pa

²I ettertid er det blitt bekreftet at noen av aggregatene slås på tidligere. Noen av butikkene har også egen ventilasjon som de styrer selv, og dette kan gi utslag på målingene.

Dataene blir logget av et måleinstrument plassert i himling med slanger ut. På Figur 4.1 og 4.2 er det markert de forskjellige stedene hvor det er utplassert måleinstrumenter. I denne oppgaven er det kun brukt data fra sensorene som er plassert ved 1 etg S, 1 etg Ø og 3 etg Bohus.



Figur 4.1: Plassering av måleinstrumenter i 1. etasje



Figur 4.2: Plassering av måleinstrumenter i 3. etasje

4.3 IDA ICE

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) er et simuleringstøytøy som bruker lokale klimadata for kartlegging av energiforbruk i bygninger, og kan gi detaljerte verdier for gitte soner [7]. Ved å bruke "Advanced Level" (Avansert Nivå) til å simulere, kan man selv gå inn på hver enkelt beregningsmodell (beskrevet i Kapittel 3.4) og gjøre endringer i parametre. Derfra kan man også logge de variablene man ønsker.

4.3.1 Klimadata

For å bygge en modell som skal representere et eksisterende bygg er det viktig at flest mulig forutsetninger er like. Dette gjør det enklere å sammenligne simuleringer med målte data. I dette tilfellet skal trykkforskjellene fra simuleringene og Airtight-målingene sammenlignes for å finne riktige lekkasjeareal. Siden trykkforskjellene avhenger av temperaturforskjell, er det hensiktsmessig å ha like klimadata. IDA ICE bru-

ker timesverdier for klimadata. Klimadataene fra Airtight-målingene kunne derfor ikke brukes, da disse logget omtrent hvert tiende minutt. Timesverdier for klimadata ble derfor hentet fra Meteorologisk Institutt's klimadatabase, eKlima[1], og lagt inn i klimafilen i IDA ICE. Dataene fra eKlima er målt av værstasjonen på Kjeller, omtrent 3 km luftlinje fra Strømmen, og vil derfor avvike noe fra de lokale klimadataene fra Airtight-målingene.

4.3.2 Oppbygning av grunnmodell

Med grunnmodell menes det at modellen er utgangspunkt for alle simuleringer. I første omgang ble den bygget for å etterligne dagens situasjon. Deretter ble det simulert tiltak, og endringer gjort på grunnmodellen knyttet til dette blir spesifisert senere i rapporten.

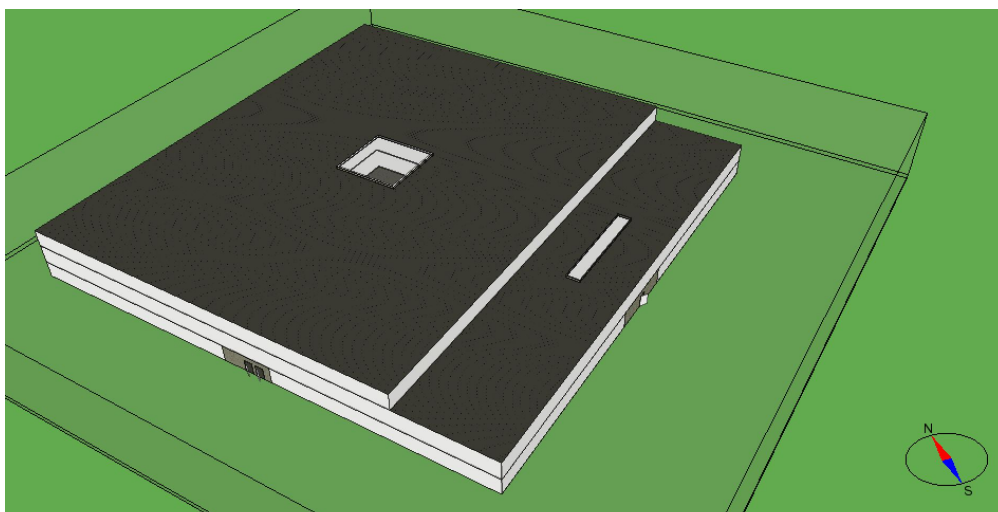
En forenklet modell av fellesområdene i bygget ble satt opp i IDA ICE. Fellesområdene er arealene mellom butikkene (markert rosa på Figur A.1, A.2 og A.3 i Vedlegg A), toaletter og alle andre oppvarmede arealer som ikke er utleid til butikker. Butikkarealene blir dermed ikke tegnet i modellen, men fellesarealene slås sammen til ett stort areal. Dette er fordi leietakerne (butikkene) betaler for sitt eget energiforbruk, og utelates derfor med hensyn til energisimuleringene for romoppvarming. Det totale oppvarmede arealet blir derimot tatt hensyn til i energisimulering for ventilasjon, da senteret har tilluft i butikkene, og felles avtrekk. Siden luftmengdene i IDA ICE bestemmes med hensyn på areal, økes disse tilsvarende med hvor mye større det totale arealet er i forhold til fellesarealene.

Tabell 4.2: Forhold mellom fellesarealer og totale oppvarmede arealer, og resulterende luftmengder brukt i simulering.

Sted	
Totalt oppvarmet areal	65.002 m^2
Fellesareal	30.451 m^2
Luftmengder	8 $\frac{L}{m^2s}$
Luftmengder justert for areal	17 $\frac{L}{m^2s}$

Modellen er delt opp i flere soner, med en sone for hver etasje. Mellom etasjene er det lagt inn åpninger slik at luften kan strømme fritt gjennom de forskjellige sonene.

Glasstakene er også egne soner, som er bygget som en lav boks med heldekkende vindu i taket.



Figur 4.3: Modellen i IDA ICE

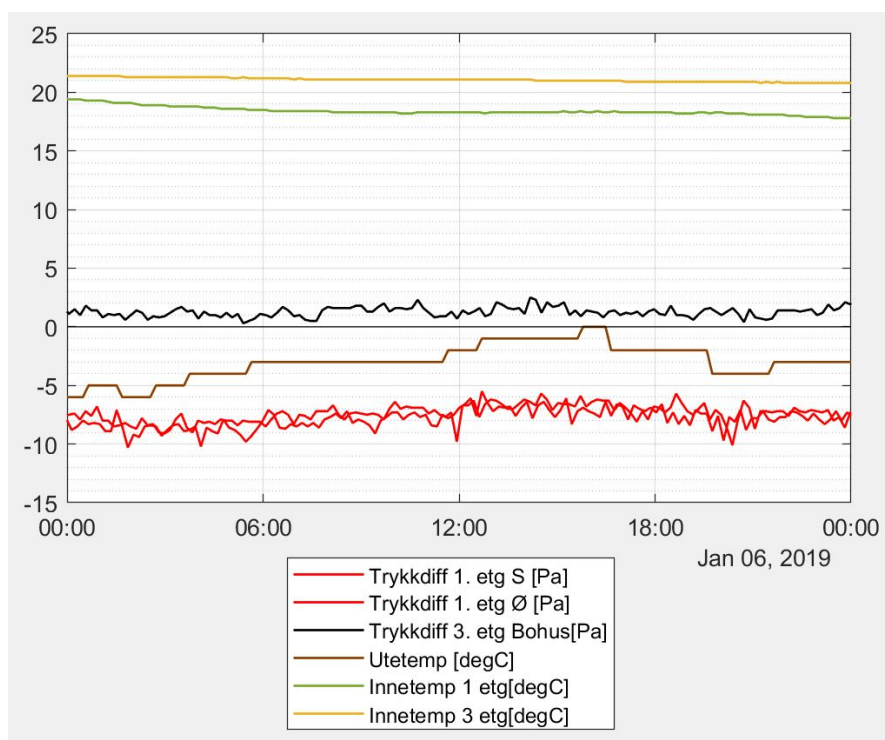
De lysegrå veggene på figur 4.3 er innervegger som vender mot butikkene. Dette er fordi rapporten kun skal se på fellesarealene og energibehovet knyttet til disse. Oppvarmingen av butikkarealene er det leietagerne som betaler for, og det gjøres derfor en forenkling. Veggene mot butikkene gis derfor en konstant temperatur på 22 °C. De mørkegrå veggene er satt som yttervegger. Arealet på disse veggene er grovt estimert, da de uansett ikke vil ha noen nevneverdig innvirkning på energiforbruket. Taket vender ut, og gulvet i første etasje vender mot grunn. Tabell 4.3 nedenfor viser inndata som er brukt i grunnmodellen i IDA ICE, samt hvor de er hentet fra.

Tabell 4.3: Verdier brukt til grunnmodell i IDA ICE.

Parameter	Verdi	Hentet fra
BRA fellesareal [m ²]	30 451	Olav Thon Gruppen
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 selv
Høyde 2. etasje [m]	4	Målt selv
Høyde 3. etasje [m]	3,7	Målt selv
Areal inngangspartier 1 etg (6stk) [m ²]	27	Målt selv
Areal glasstak 1 [m ²]	210	Info fra Olav Thon Gruppen
Areal glasstak 2 [m ²]	68	Info fra Olav Thon Gruppen
U-verdi gulv mot grunn [W/m ² K]	0,30	NS 3031 tabell B.1
U-verdi vegger [W/m ² K]	0,45	NS 3031 tabell B.1
U-verdi tak [W/m ² K]	0,23	NS 3031 tabell B.1
U-verdi vindu [W/m ² K]	1,2	NS 3031 tabell B.2
Lekkasjetall [1/h]	1,5	NS 3031 tabell B.4

Modellen settes opp med ekvivalent lekkasjeareal i de ulike etasjene, som er basert på byggets lekkasjetall. I tillegg er det blitt gjort målinger av størrelsen til dørene på senteret, og for enkelhets skyld er alle dørene like i modellen. Siden de er skyvedører, har de blitt gitt et lekkasjeareal på $0,002m^2$ per meter omkretslengde.

Lekkasjearealene i taket ble funnet ved å sammenligne sammenlignende trykkurver fra simuleringene med trykkurver fra Airtight-målingene. Trykkforskjellene ble sammenlignet med målinger fra 6. januar, en søndag hvor ventilasjonen var av. Dette for å unngå trykkpåvirkning av åpne dører og mulig ventilasjonsubalanse. Ved like temperaturforhold i simulering og måling vil trykkforskjellene kun være påvirket av størrelsen på lekkasjearealer og plassering av disse.



Figur 4.4: Trykkforskjell målt av Airtight 6. januar 2019, når senteret er stengt og ventilasjonen avslått.

Airtight-målingen viser at nøytralplanet befinner seg rett under måleinstrumentene i 3. etasje, altså rett under himling. Ved målerne i 1. etasje er det et undertrykk som varierer med en differanse på mellom 5 og 10 pascal. Differansen reduseres med økende utetemperatur.

Formel 5 kan brukes som en pekepinn på hvor det er store lekkasjer. Nøytralplanet plassering viser i følge Formel 5 at det er store utettheter/lekkasjearealer øverst i bygget. Man kjenner ikke til de nøyaktige lekkasjearealene under nøytralplanet og plasseringene deres i bygget. Dermed kan ikke Formel 5 brukes til å regne seg tilbake til areal og plassering for lekkasjearealene over nøytralplanet. Derfor må de lekkasjene som er kjent legges inn, og noen forenklinger må gjøres.

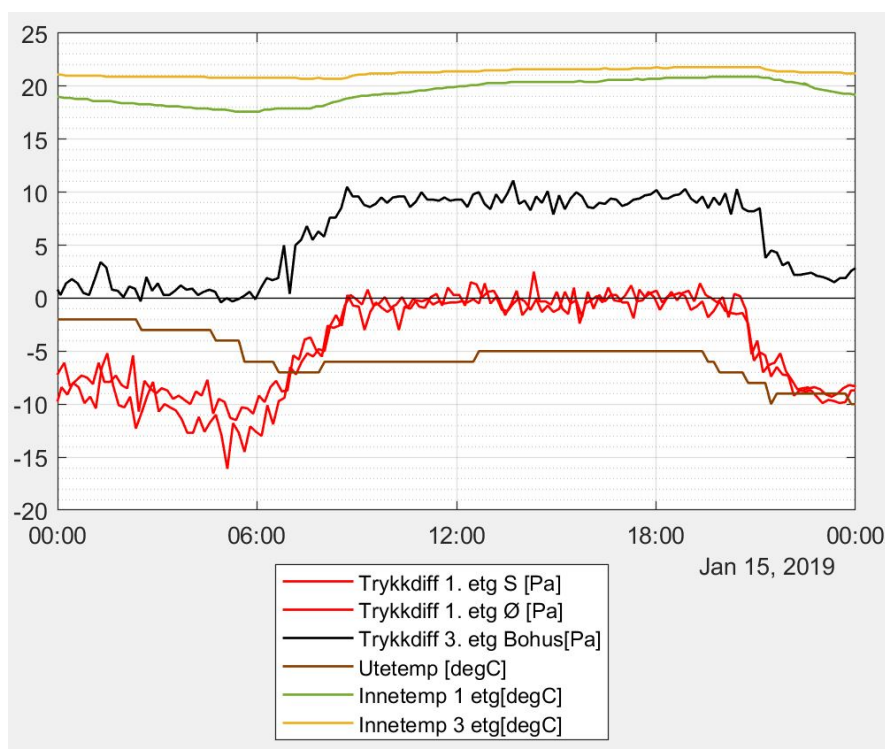
4.3.3 S1: Simulering av dagens situasjon

De totale lekkasjearealene som er brukt er oppgitt i Tabell 4.4. Modellen ble simulert flere ganger med ulike verdier for lekkasjearealene i glasstakene(iterativt), helt til en tilnærmet lik trykk-kurve ble funnet ved bruk av de oppgitte verdiene. Trykkkurvene simuleres med en avstand på 3 m fra gulvet, for å etterligne plasseringen av sensorene.

Tabell 4.4: Lekkasjearealer simulert i IDA ICE, utenfor åpningstid.

Sted	Areal [m^2]
1. etg	2,02
2. etg	0,399
3. etg	1,59
Lite glasstak (2.etg)	1,5
Stort glasstak (3. etg)	5
Dører totalt (lukket)	0,15

Etter at riktige lekkasjearealer i glasstakene var funnet, måtte det gjøres nye simuleringer for å få riktig trykk-kurve i åpningstiden. I åpningstiden vil ventilasjonsubalanse og varierende åpningsareal på dørene også kunne være med på å påvirke nøytralplanets plassering. Det ble valgt å ta utgangspunkt i Airtight-målingene fra tirsdag 15. januar, fordi utetemperaturen da var nokså lik temperaturen i klimafilen i IDA ICE.



Figur 4.5: Trykkforskjell målt av Airtight 15. januar 2019

Airtight-målingen på Figur 4.5 viser at nøytralplanet fra rundt 06.00 til 09.00, flytter seg fra himlingen i 3. etasje, til himlingen i 1. etasje. Fra 20.30 til 22.00 flytter det seg tilbake igjen. Dette blir antatt å være en kombinasjon av åpne dører (større lekkasjearreal i nederste del av bygget), og ubalanse i ventilasjonen som gradvis slås på om morgenen. For å få en lignende kurve ved simulering i IDA ICE, må åpningsarealet til dørene finnes først, for så å justere ventilasjonsubalansen til nøytralplanet ligger i 1 etasje.

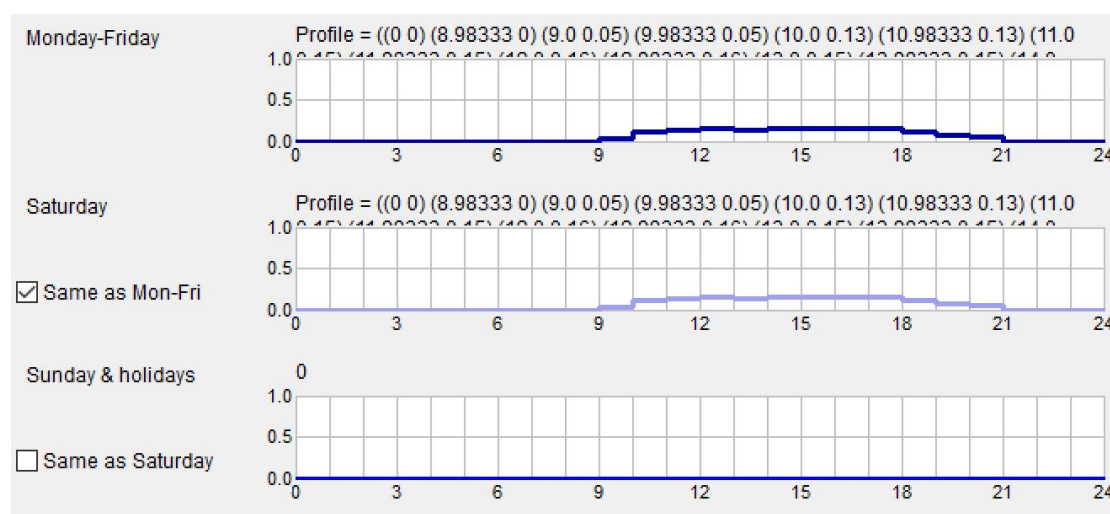
Åpningsarealet til dørene vil variere over dagen, etter hvor mange som passerer gjennom dørene. Strømmen Storsenter har tellere ved hver inngang som registrerer hvor mange mennesker som går inn og ut i løpet av en time. Timesdata fra 15 januar 2019 ligger i Vedlegg B. Formel 9 viser hvordan luftstrøms-koeffisienten C_a beregnes som en funksjon av antall mennesker i timen [PPH]. Man vil, som beskrevet tidligere, bytte ut lekkasjekoeffisienten C_d med den mer nøyaktige luftstrømskoeffisienten C_a . I IDA ICE er lekkasjekoeffisienten C_d en konstant parameter, og kan derfor ikke byttes ut direkte. I stedet blir kontrollsignalet S som bestemmer åpningsarealet satt som en funksjon av

C_d og C_a , for å kunne varieres for hver time:

$$S = \frac{C_a}{C_d} \quad (24)$$

C_d blir gitt en konstant verdi på 0,62 (skyvedør med vindfang)[11].

Figur 4.6 viser den gjennomsnittlige åpningsgraden på dørene for hver time i en uke, og Tabell 4.5 viser de resulterende totale lekkasjearealene for dørene, lekkasjearealene i taket som ble funnet i forrige simulering, samt øvrige lekkasjearealer.



Figur 4.6: Dørenes åpningsareal over et døgn, hvor 0 = helt lukket, og 1 = helt åpen.

Tabell 4.5: Lekkasjearealer simulert i IDA ICE, en dag hvor senteret holder åpent.

Sted	Areal [m^2]
1. etg	2,02
2. etg	0,399
3. etg	1,59
Lite glasstak (2.etg)	1,5
Stort glasstak (3. etg)	5
Dører, lukket (sum)	0,15
Dører, åpningstid (sum)	0,15-4,59 (varierer)
Èn helt åpen dør	4,5

Ventilasjonsdata for simuleringene er vist i Tabell 4.6

Tabell 4.6: Inndata for ventilasjon i IDA ICE.

Parameter	Verdi
Ventilasjonsprinsipp	VAV
Gjenvinningsgrad [%]	70
SFP [$\frac{kW}{m^3s}$]	2,5
Driftstid	10,75/6/52
Luftmengde tilluft [$\frac{L}{m^2s}$]	17
Luftmengde avtrekk [$\frac{L}{m^2s}$]	16
Tilluftstemperatur [$^{\circ}C$]	18 eller 21

Avtrekksluftmengden ble gradvis justert ned til trykkurven fra simuleringene var mest mulig lik målingene. Luftmengdene er basert på informasjon om aggregatsstørrelser, gitt av Olav Thon Gruppen. Luftmengdene viste seg å tilsvare omtrent $8 \frac{L}{m^2s}$. Grunnen til at det simuleres med $17 \frac{L}{m^2s}$, er at man vil ha med de totale luftmengdene for hele senteret selv om modellen kun består av fellesarealer. Luftmengdene er derfor ganget opp slik at man simulerer med de totale luftmengdene. Dette må gjøres for å få riktig energibehov til ventilasjonen, som deretter blir arealvektet med hensyn på fellesarealene igjen³. Tilluftstemperaturen avhenger av om det simuleres for trykkforhold og energibehov til romoppvarming, eller om det simuleres for energibehov til ventilasjon. I virkeligheten blir tilluften tilført i butikkene og ledes ut til felles avtrekk. Når luften når fellesarealene er den derfor allerede blitt varmet opp inne i butikkene. I modellen er derimot tilluften plassert i fellesarealet, og bruk av 'riktig' tilluftstemperatur vil gjøre energibehovet for romoppvarming høyere enn det egentlig er (se Vedlegg D.2). Ved simulering av trykkforhold og energibehov til romoppvarming settes derfor tilluftstemperaturen til $21^{\circ}C$, som er den antatte temperaturen til luften når den kommer ut av butikkene. Når det kommer til energibehov til ventilasjonsvarme er det riktig å simulere med $18^{\circ}C$ ('riktig' tilluftstemperatur). Alle tilfellene simuleres derfor i to omganger.

Luftmengdene gjennom dørene vil variere med hvor mange dører som står oppe av gangen. Siden modellen er simulert med gjennomsnittlig åpningsgrad på dørene vil resultatene også vise luftmengdene gjennom dørene når alle står litt oppe. Den totale luftmengden blir altså fordelt på flere dører, og gir ikke et godt bilde på hvor store

³Det ble først, med en feil, simulert med $8 \frac{L}{m^2s}$, denne feilen påvirker imidlertid ikke trykkforholdene. Resultater fra dette kan ses i Vedlegg C.

luftmengder det i verste fall kan være på ett sted. For å kunne finne høyeste mulig luftmengde (for å kunne si noe om termisk komfort), lages et duplikat av modellen, hvor alle utenom én dør lukkes. Den ene døren som fortsatt er åpen settes vidåpen ($S=1$) i hele åpningstiden.

4.3.4 S2: Simulering av dagens bygg med balansert ventilasjon

Som S1, men med $17 \frac{L}{m^2s}$ både på tilluft og avtrekk.

4.3.5 S3: Simulering av tiltak hvor tak tettes, ventilasjon som i dag

Som S1, men lekkasjene i taket settes til standard, basert på lekkasjetallet.

4.3.6 S4: Simulering av tiltak med tett takk og balansert ventilasjon

Som S3, men med $17 \frac{L}{m^2s}$ både på tilluft og avtrekk.

5 Resultater

5.1 S1: Dagens situasjon

5.1.1 Sammenligning av trykkforhold med Airtight-målinger (verifisering av modell)

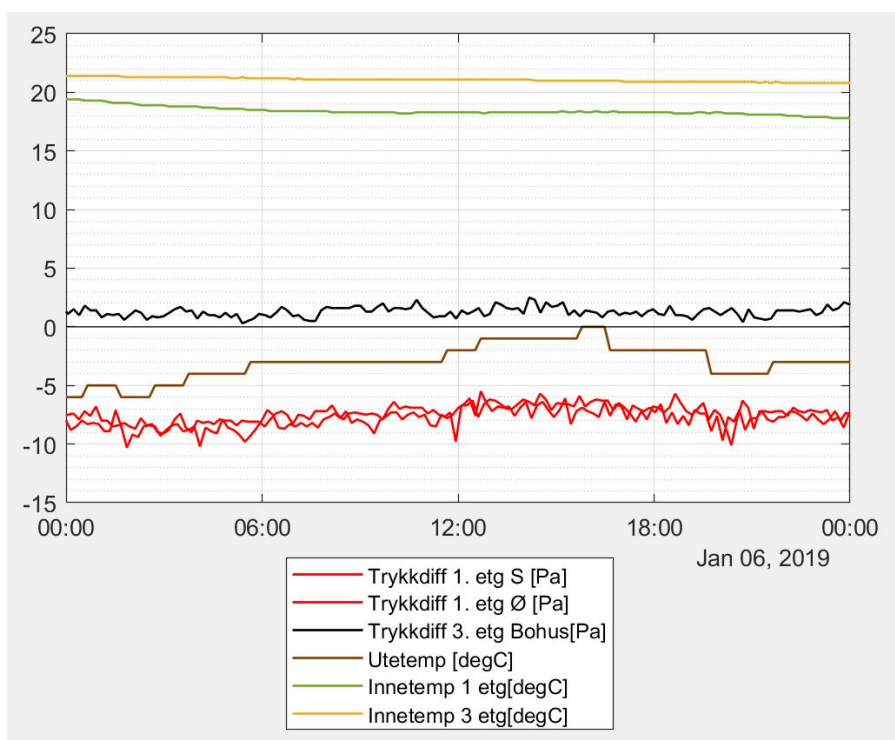
Utenom åpningstid

Tabell 5.1 viser lekkasjearealene i glasstakene som ble brukt for å simulere dagens situasjon.

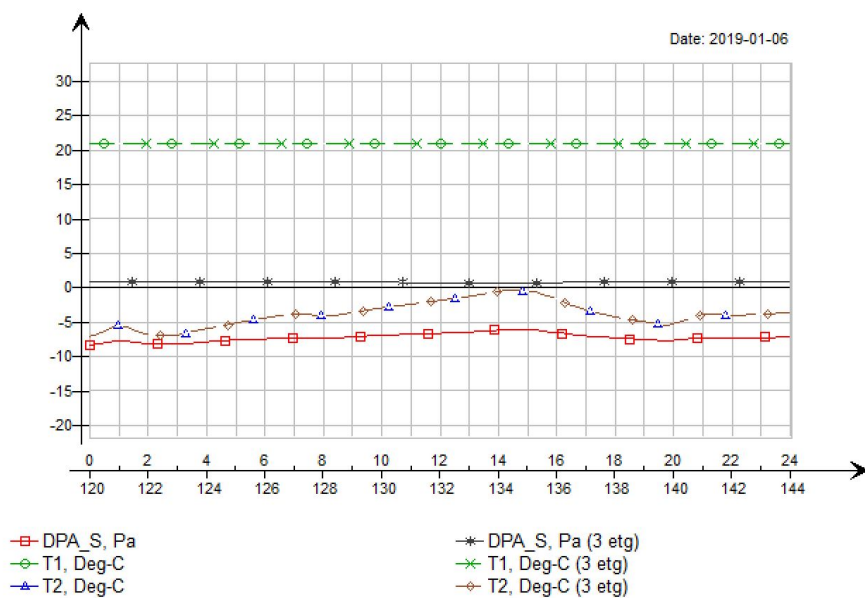
Tabell 5.1: Glasstakenes lekkasjeareal, som resulterte i like trykkforhold som Airtight-målingene.

Sted	Areal [m^2]
Lite glasstak (2.etg)	1,5
Stort glasstak (3. etg)	5

På Figur 5.1 ser man trykkforskjellene målt av Airtight, søndag 6. januar. Ventilasjonen er slått av, og påvirker derfor ikke trykket. Figur 5.2 viser simuleringen gjort av samme dag, med relativt lik utetemperatur og avslått ventilasjon.



Figur 5.1: Trykkforskjell målt av Airtight 6. januar 2019



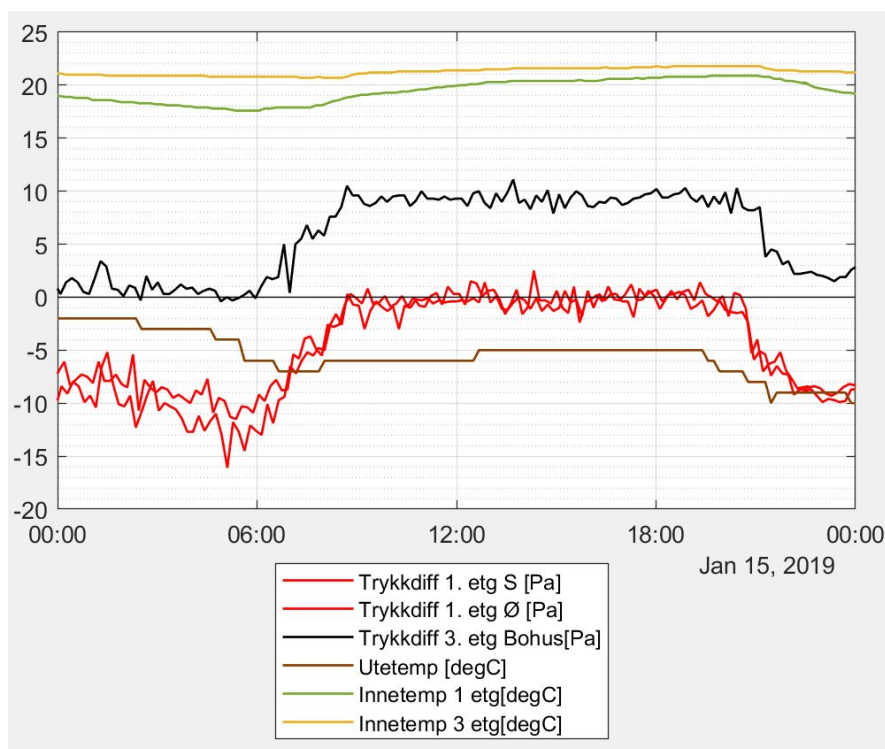
Figur 5.2: Trykkforskjell simulert i IDA ICE 6. januar 2019

I åpningstid

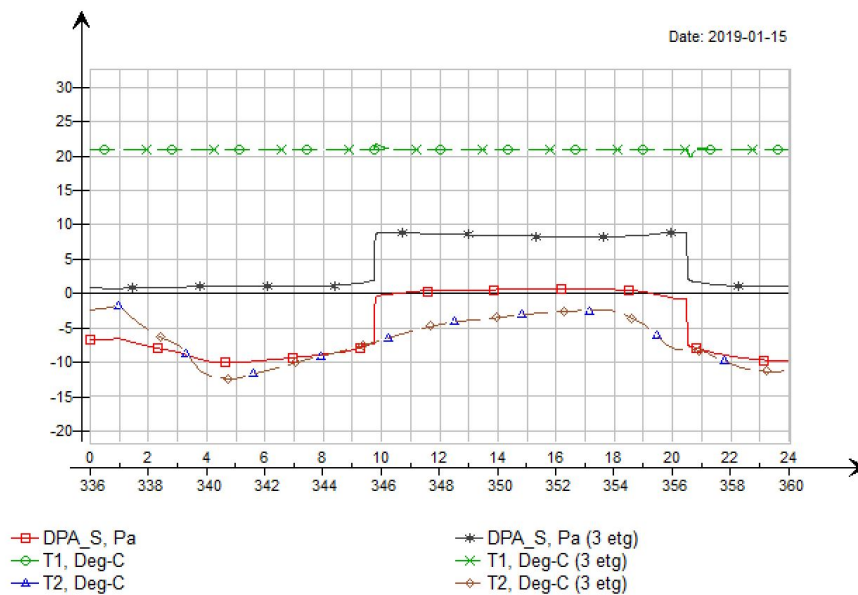
Tabell 5.2: Ventilasjonsluftmengder for simulering av dagens situasjon, som resulterte i like trykkforhold som Airtight-målingene.

	min	max
Tilluft [$\frac{L}{m^2s}$]	2	17
Avtrekk [$\frac{L}{m^2s}$]	2	16

På Figur 5.3 ser man trykkforskjellene målt av Airtight, tirsdag 15. januar. Ventilasjonen er på i åpningstiden, og påvirker, sammen med døråpningene, trykkforskjellene. Figur 5.4 viser simuleringene av samme dag, med ventilasjon på fra 09.45 til 20.30.



Figur 5.3: Trykkforskjell målt av Airtight 15. januar 2019



Figur 5.4: Trykkforskjell simulert i IDA ICE 15. januar 2019

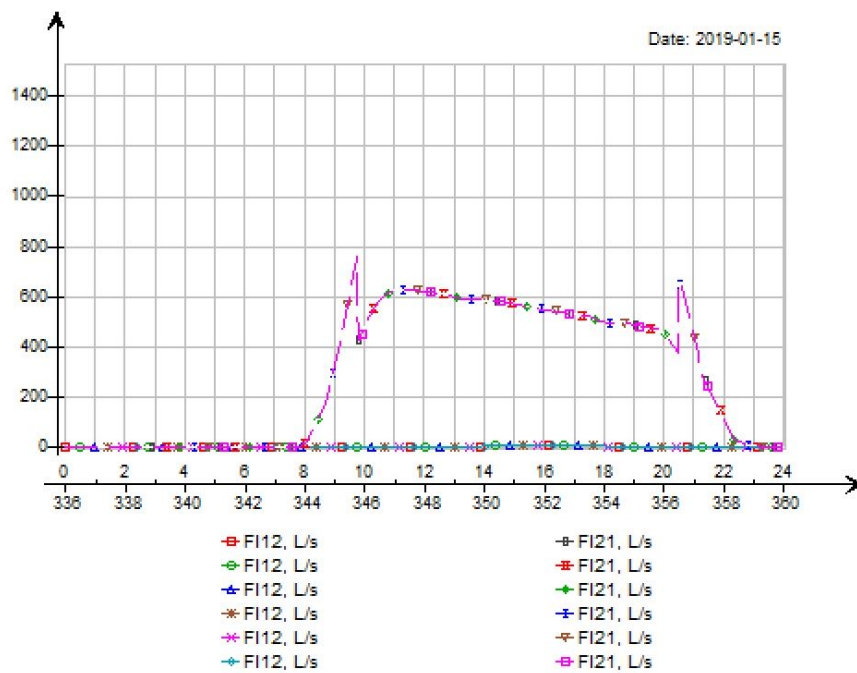
5.1.2 Energibehov, dagens situasjon

Tabell 5.3: Energibehov, dagens situasjon.

Energipost	Energibehov [$\frac{kWh}{\ddot{a}r}$]	Spesifikt energibehov [$\frac{kWh}{m^2\ddot{a}r}$]
Romoppvarming	1.683.550,0	55,3
Ventilasjonsoppvarming (Totalt)	3.728.404,7	57,4
Ventilasjonsoppvarming (Arealvektet for fellesområder)	1.746.617,8	57,4
Sum	3.430.167,8	112,7

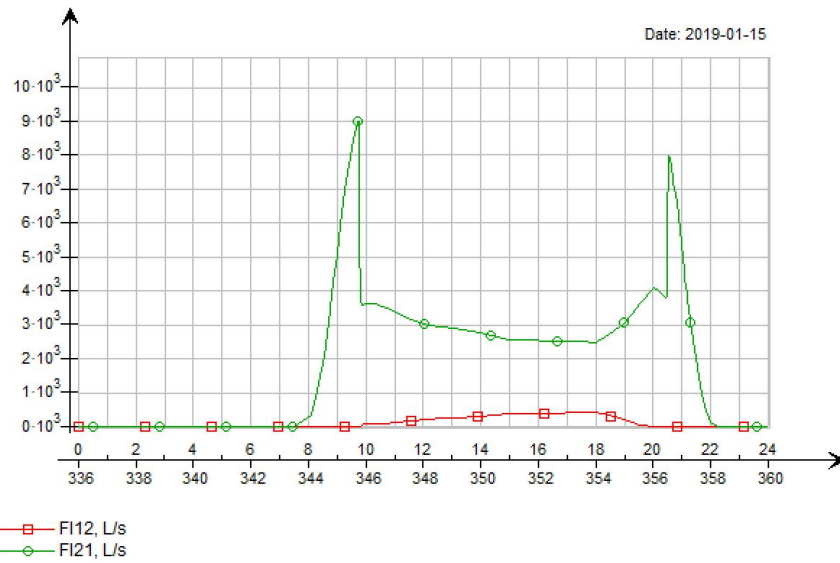
5.1.3 Luftstrømmer gjennom dører, dagens situasjon

Figur 5.5 viser gjennomsnittlige luftmengder gjennom dørene. FI12 er luftmengdene *ut* av bygget, og FI21 er luftmengdene *inn* til bygget. Her representerer de flate kurvene det som går ut, og de varierende kurvene det som kommer inn. Luftmengdene er like ved alle dørene, og tar utgangspunkt i timesverdier for gjennomsnittlig åpningsareal i løpet av dagen.



Figur 5.5: Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, dagens situasjon.

Figur 5.6 viser luftmengdene gjennom en dør som står helt åpen, samtidig som alle andre dører er lukket.



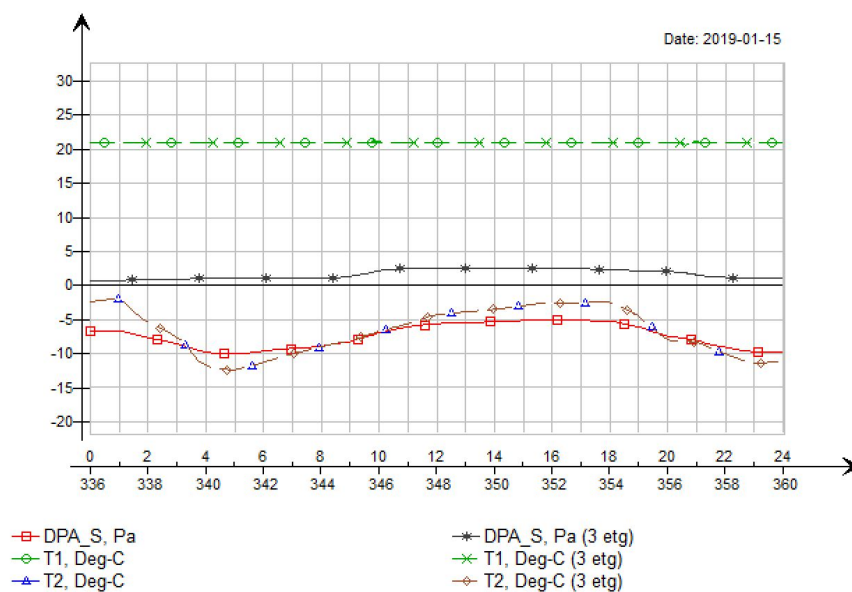
Figur 5.6: Luftmengder inn gjennom èn dør som står helt åpen, dagens situasjon.

5.2 S2: Balansert ventilasjon

Tabell 5.4: Ventilasjonsluftmengder for simulering med balansert ventilasjon.

	min	max
Tilluft [$\frac{L}{m^2s}$]	2	17
Avtrekk [$\frac{L}{m^2s}$]	2	17

5.2.1 Trykkforhold ved balansert ventilasjon



Figur 5.7: Trykkforhold ved balansert ventilasjon.

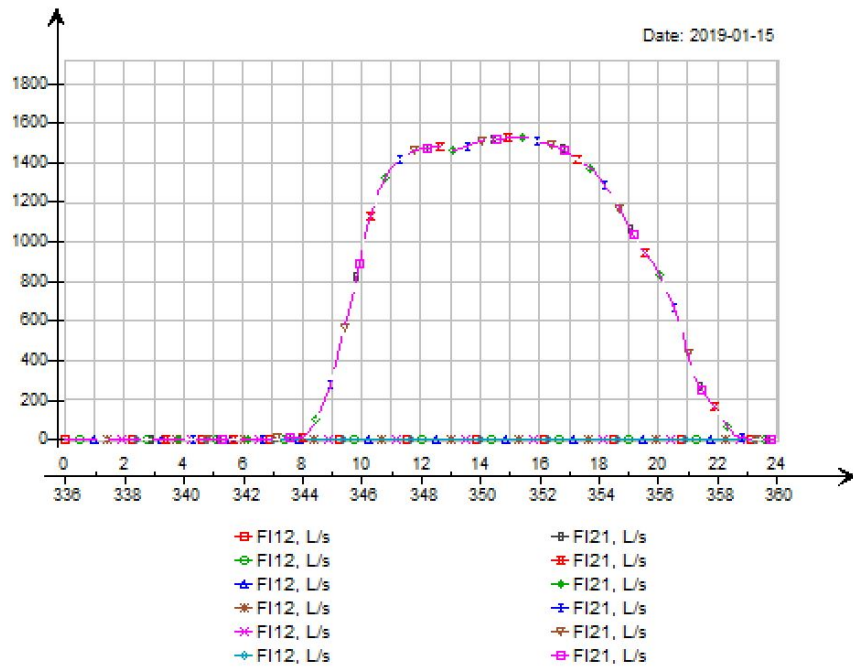
5.2.2 Energiforbruk ved balansert ventilasjon

Tabell 5.5: Energibehov, balansert ventilasjon.

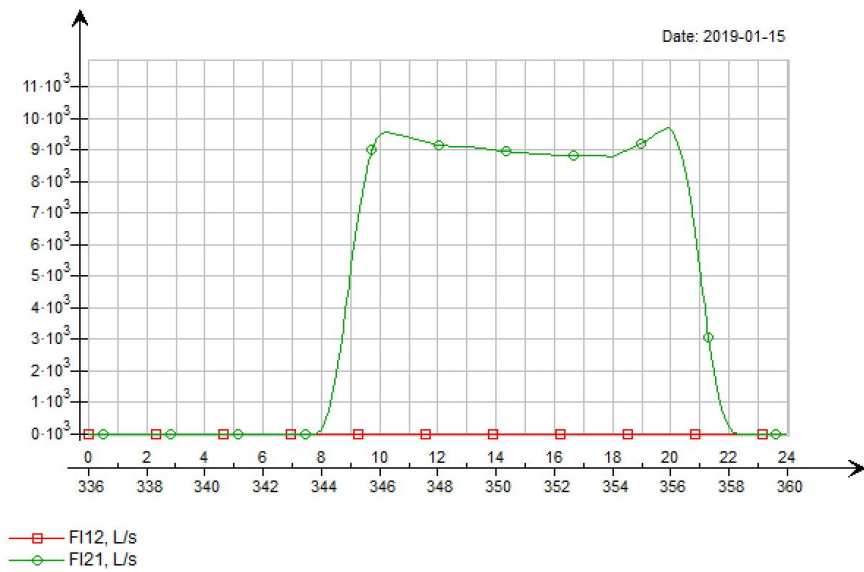
Energipost	Energibehov [$\frac{kWh}{\text{år}}$]	Spesifikt energibehov [$\frac{kWh}{m^2 \text{år}}$]
Romoppvarming	2.174.246,0	71,4
Ventilasjonsoppvarming (Totalt)	2.767.377,2	42,6
Ventilasjonsoppvarming (Arealvektet for fellesområder)	1.296.412,5	42,6
Sum	3.470.658,5	114

5.2.3 Luftstrømmer gjennom dører ved balansert ventilasjon

FI12 er luftmengdene *ut* av bygget, og FI21 er luftmengdene *inn* til bygget.



Figur 5.8: Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved balansert ventilasjon.



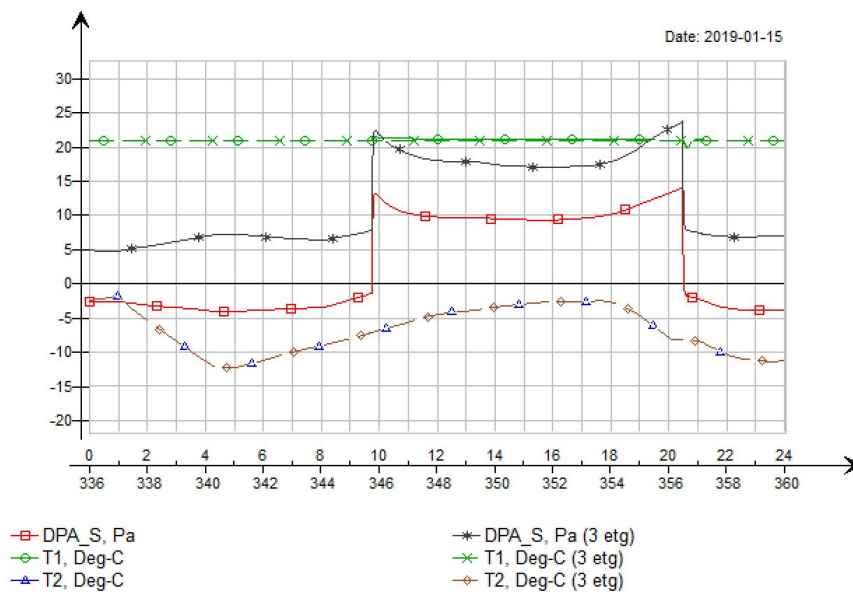
Figur 5.9: Luftmengder gjennom en dør som står helt åpen, ved balansert ventilasjon.

5.3 S3: Tiltak: Tetting av tak, ventilasjon som i dag

5.3.1 Trykkforhold etter tetting av tak

Lik ventilasjon som i dag

På Figur 5.10 ser man trykkforskjellene ved at man tetter lekkasjene i taket. Ventilasjonen er den samme som for S1.



Figur 5.10: Trykkforskjell ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.

5.3.2 Energiforbruk etter tetting av tak

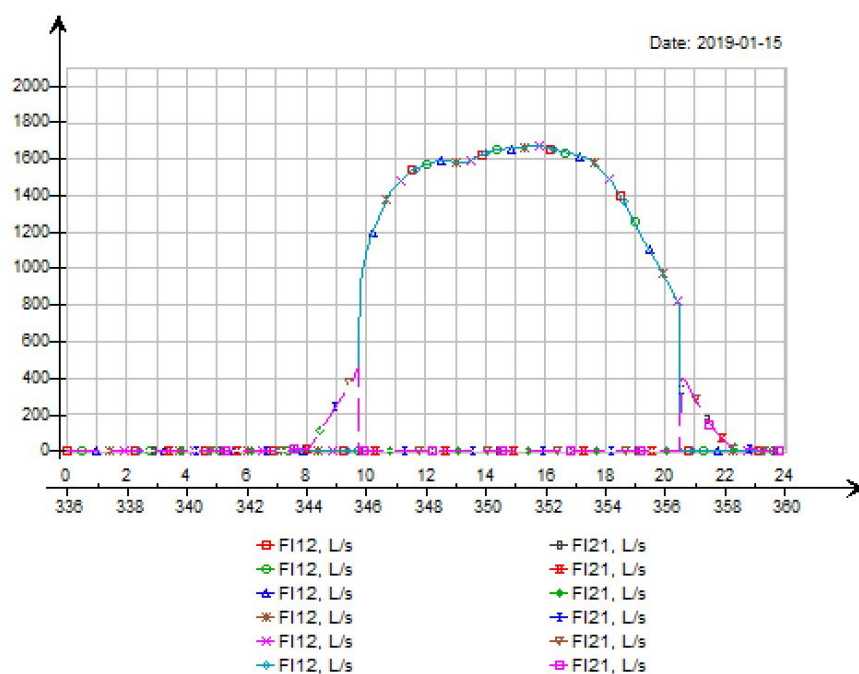
Tabell 5.6: Energibehov, tett tak og ventilasjon som i dag.

Energipost	Energibehov [$\frac{kWh}{\text{år}}$]	Spesifikt energibehov [$\frac{kWh}{m^2 \text{år}}$]
Romoppvarming	1.010.409,0	33,2
Ventilasjonsoppvarming (Totalt)	3.724.026,0	57,3
Ventilasjonsoppvarming (Arealvektet for fellesområder)	1.744.566,6	57,3
Sum	2.754.975,6	90,5

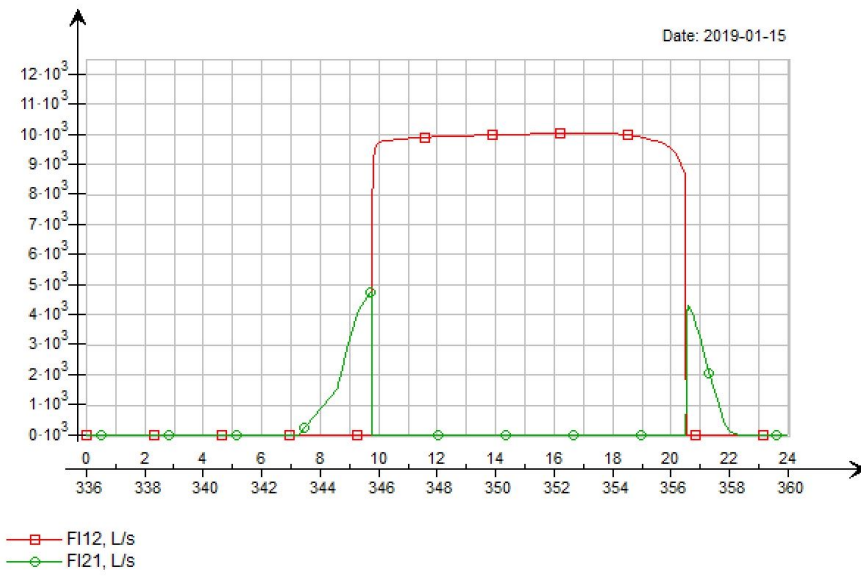
5.3.3 Luftstrømmer gjennom dører ved tetting av tak

Lik ventilasjon som i dag

Figur 5.11 viser gjennomsnittlige luftmengder gjennom dørene. FI12 er luftmengdene *ut* av bygget, og FI21 er luftmengdene *inn* til bygget. Luftmengdene *inn* dørene stiger fra kl 8.00 til 9.45 (når ventilasjonen skrur på), deretter faller den til 0 og blir der til ventilasjonen slås av igjen kl 20.30. Da stiger den brått, og faller videre mot 0 frem til kl 23.00. Luftmengdene *ut* av dørene stiger brått når ventilasjonen slås på, og synker brått når den slås av. Variasjonen i løpet av dagen er bestemt av varierende åpningsareal og trykkforskjeller.



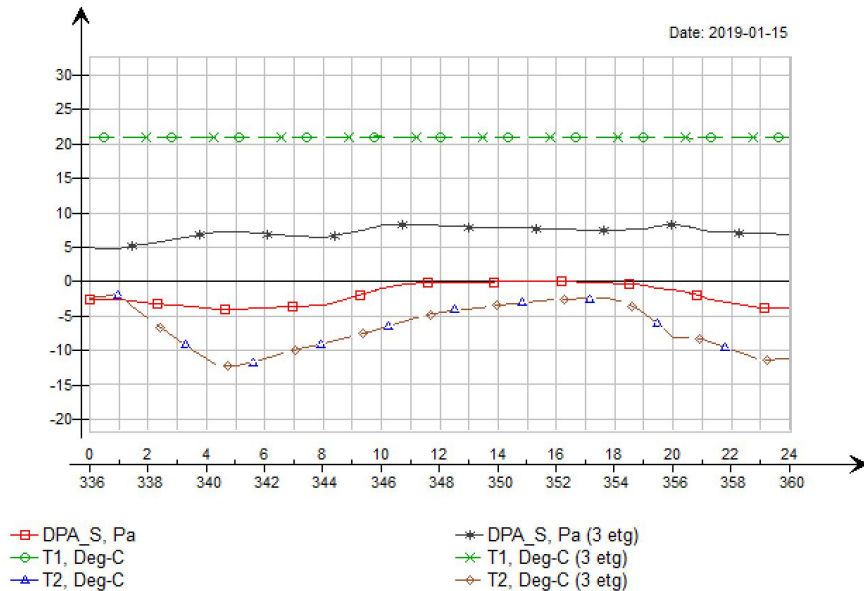
Figur 5.11: Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.



Figur 5.12: Luftmengder gjennom en dør som står helt åpen, ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.

5.4 S4: Tiltak: Tetting av tak, balansert ventilasjon

5.4.1 Trykkforhold ved tett tak og balansert ventilasjon



Figur 5.13: Trykkforskjell ved tetting av tak og balansert ventilasjon.

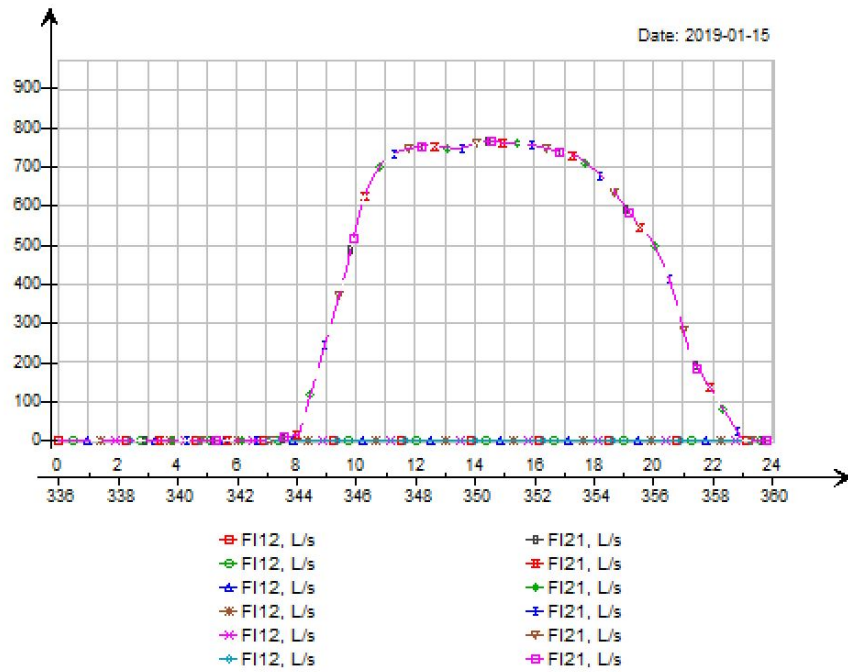
5.4.2 Energiforbruk ved tett tak og balansert ventilasjon

Tabell 5.7: Energibehov, tett tak og balansert ventilasjon.

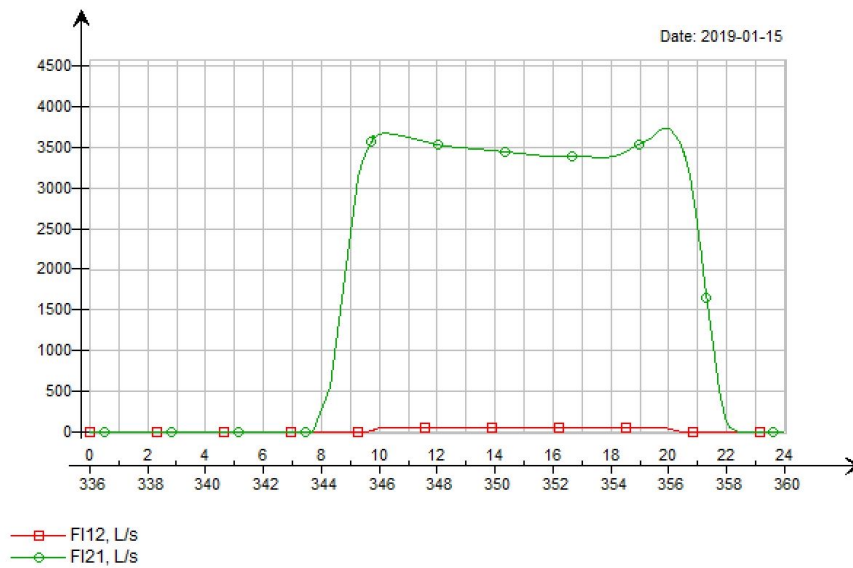
Energipost	Energibehov [$\frac{kWh}{\text{år}}$]	Spesifikt energibehov [$\frac{kWh}{m^2 \text{år}}$]
Romoppvarming	1.265.646,0	41,6
Ventilasjonsoppvarming (Totalt)	2.615.252,3	40,2
Ventilasjonsoppvarming (Arealvektet for fellesområder)	1.225.147,7	40,2
Sum	2.490.793,7	81,8

5.4.3 Luftstrømmer gjennom dører ved tett tak og balansert ventilasjon

FI12 er luftmengdene *ut* av bygget, og FI21 er luftmengdene *inn* til bygget.



Figur 5.14: Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved tetting av tak og balansert ventilasjon.



Figur 5.15: Luftmengder gjennom en dør som står helt åpen, ved tetting av tak og balansert ventilasjon.

6 Diskusjon

Målingene fra Airtight (Figur 4.4) viser at det utenom driftstid er undertrykk i nesten hele bygget. Teoridelen i denne rapporten, ved Figur 3.1 og Formel 5, beskriver hvordan nøytralplanets plassering blir påvirket av størrelse og plassering av lekkasjer. Simuleringene som er gjort (Figur 5.2, Tabell 4.5) bekrefter at undertrykket skyldes store lekkasjearealer i den øverste delen av bygget. Det er rimelig å anta at grunnet byggets alder, vil mye av disse arealene ligge i bygningskomponenter som ikke lenger lever opp til dagens standard. Glasstakene vil påvirke tettheten til bygget, da glasselementer i fasaden generelt har dårligere tetthet enn vanlige fasadeelementer[4]. Siden disse i tillegg er nokså gamle og/eller har blitt dårlig vedlikeholdt, vil sprukne og gamle pakninger være med på å øke lekkasjearealet ytterligere. Dette vil spesielt være et problem i det store glasstaket, som i tillegg har åpningsvinduer.

Sammenligningene av målingene fra Airtight (Figur 4.5) og trykkforholdene fra S1 (Figur 5.4), er like nok til at modellen kan brukes videre for å undersøke tiltak. Trykkforskjellene, og dermed også nøytralplanets plassering, blir i åpningstiden påvirket av både gjennomsnittlig åpningsareal på dørene og ventilasjonsubalanse. Ventilasjonsubalansen viser seg å være $1 \frac{L}{m^2s}$ mindre på avtrekkssiden enn på tilluftssiden. Dette gjelder også dersom det hadde vært mindre luftmengder (se Vedlegg C).

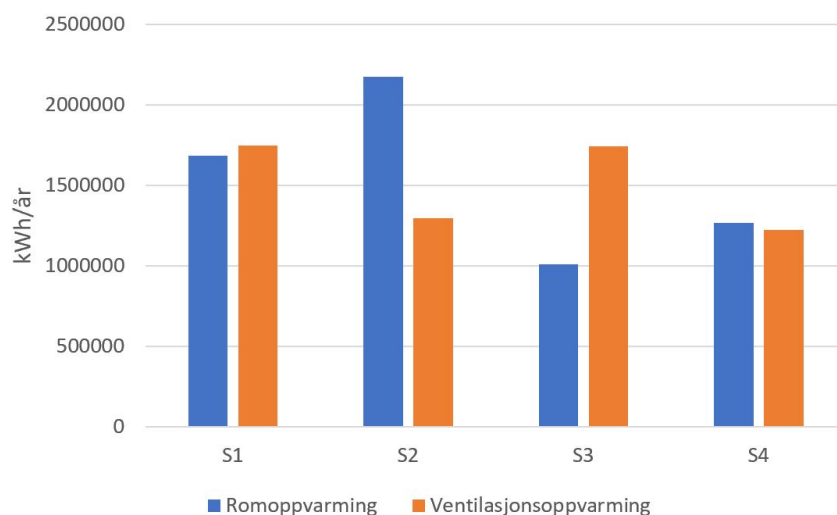
I Vedlegg E vises trykkforholdene dersom det er balansert ventilasjon og alle dørene er stengt. S2 har også balansert ventilasjon, og viser derfor hvordan gjennomsnittlig åpningsareal på inngangsdørene påvirker trykkforholdene (Figur 5.7).

S3 er simulert med samme luftmengder som S1, men med tett tak. Her ser man at å tette takene vil redusere undertrykket i første etasje, og øke overtrykket i tredje etasje med det tilsvarende. Den 15 januar 2019 kl 00.00 er undertrykket redusert med ca 4,5 Pa, sammenlignet med S1. I driftstiden blir det derimot et stort overtrykk i første etasje på 10 Pa, grunnet den ubalanserte ventilasjonen. Det er store luftmengder som går *ut* av dørene, og det kan derfor være mye energi å spare på å nedjustere overtrykket.

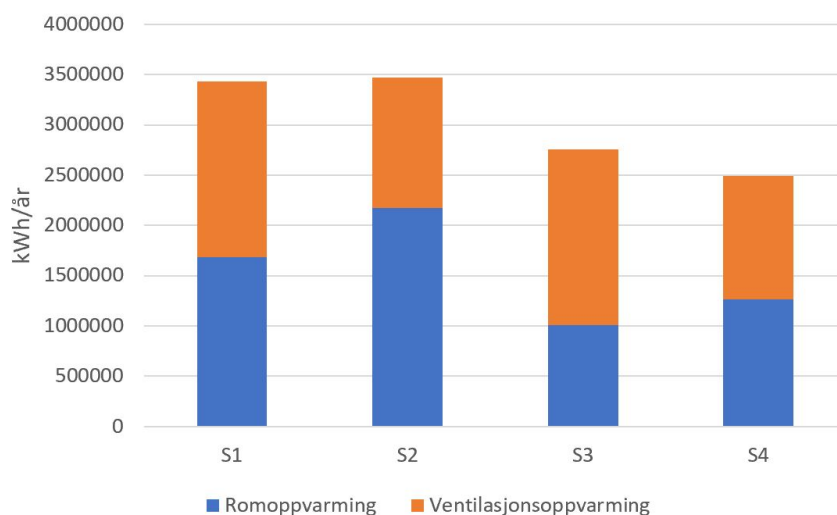
S4 har tett tak og balansert ventilasjon. Utenom driftstid er S4 lik S3. Trykkkurven er ganske jevn, med et lite undertrykk i første etasje utenom åpningstiden. Dette skyldes at bygget ikke er 100% tett, men har jevnt fordelte lekkasjer i fasaden som tilsvarer

lekkasjetallet. I åpningstiden bidrar døråpningene til at trykkforskjellen i 1 etasje blir tilnærmet null. Luftmengdene gjennom dørene er omtrent like som S1, men bare halvparten av S2.

Figur 6.1 illustrerer det årlige energibehovet for de forskjellige situasjonene, delt opp i energipost. Figur 6.2 illustrerer det totale årlige energibehovet for ventilasjons- og romoppvarming for hver situasjon.



Figur 6.1: Energibehovet for hver simulerte situasjon, delt opp i post.



Figur 6.2: Energibehovet for hver simulerte situasjon, stablet

Dersom man sammenligner energibehovet til S1 og S2, hvor den eneste forskjellen er ubalansert og balansert ventilasjon, ser man at S1 har litt lavere energibehov. Med S1 er behovet for romoppvarming 490696 kWh mindre per år. Om man ser på energibehovet til ventilasjonsoppvarming, blir nesten alt tatt igjen av tapt varmegjenvinning av ventilasjonsluften, som gjør at man ved ubalansert ventilasjon må bruke 450205,8 kWh ekstra til oppvarming av tilluft. Energibesparelsen ved å velge S1 fremfor S2 blir på 40490,7 kWh per år. For et bygg av denne størrelsen er det ikke så mye, men den termiske komforten blir likevel bedre. Ser man på luftstrømmene gjennom inngangspartiene (Figur 5.5, 5.6, 5.8 og 5.9), ser man at de er mye lavere ved S1 enn S2.

Sammenligner man energibehovet mellom S3 og S1, vil behovet for romoppvarming ved S3 reduseres med 673141 kWh per år, samtidig som energibehovet til ventilasjonsoppvarming forblir omtrent det samme.

Sammenligner man S4 med S1, blir behovet for romoppvarming og ventilasjonsoppvarming redusert med henholdsvis 417904 kWh og 521470,1 kWh årlig, som gir en årlig besparelse på 939374,1 kWh.

Forslag til videre arbeid

Andre tiltak som bør undersøkes videre er energibesparelsen og bedring av termisk komfort ved utskiftning av dører, enten nyere og moderne skyvedører som ikke står så lenge oppe av gangen, eller rundeller som ikke vil gi direkte åpning ut. Det burde også undersøkes videre hvor mye tetting av bygget vil koste, og om det vil være hensiktsmessig, med tanke på termisk komfort, å justere ventilasjonen til å gi et ørlite overtrykk for å redusere luftmengdene gjennom dørene. Dette vil mest sannsynlig gjøre energibesparelsen noe mindre, men fortsatt mye bedre enn ved S3, som er det nest beste simulerte tilfellet mtp energibehov.

7 Konklusjon

Denne oppgaven har tatt for seg følgende problemstillinger:

- Hvordan blir trykkforhold påvirket av luftlekkasjers arealer og plassering i bygget? Hvordan vil dette påvirke termisk komfort og energibruk?
- Hvordan kan ventilasjonssystemet påvirke trykkforhold?
- Hvor mye vil trykkutjevning ved struping av avtrekk redusere energiforbruket, samt bedre termisk komfort?
- Hvordan blir inngangene påvirket av ulike ventilasjonsforhold, og hvordan endrer dette seg ved et tett bygg?

Hypotesen var at et tetttest mulig bygg vil være mest energibesparende, siden det uten lekkasjer ikke vil være behov for trykkutjevningstiltak.

De to første problemstillingene gjelder generelt for alle bygg, og ble besvart i teori-delen. Det ble vist at nøytralplanet plassering blir bestemt av størrelse og plassering av lekkasjearealer. Er det store lekkasjer i toppen av bygget, vil nøytralplanet være høyt oppe, og vice versa. Hvis bygget teoretisk sett er helt tett, vil nøytralplanet ligge langs gulvet. Dersom bygget har åpne dører, men ellers er helt tett, vil nøytralplanet legge seg i midten av dørene. Dette er altså det scenarioet man helst vil oppnå, og det vil også gjøre at den kalde luften ikke trekker inn i bygget, fordi man ikke har noen lekkasjer som fungerer som drivkraft (skorsteinseffekten). Sammenligner man S1 og S4 utenom åpningstiden, ser man at ved å redusere lekkasjearealene i toppen av bygget, så flytter nøytralplanet seg fra toppen av 3 etasje til ca midten av 2 etasje. Sammenligner man S1 med S2, og S3 med S4, ser man at trykket i bygget reduseres ved balansert ventilasjon.

De to siste problemstillingene gjaldt Strømmen Storsenter, og ble løst ved å simulere bygget i IDA ICE. Trykkutjevning ved struping av avtrekk resulterer i et totalt redusert energibehov på 40490,7 kWh per år, sammenlignet med balansert ventilasjon. Det er ikke så veldig mye, og skyldes at mye av varmen, som ellers kunne gått til varme-gjenvinning, går tapt gjennom lekkasjer forårsaket av høyere overtrykk øverst i bygget. Det blir dog mindre luftmengder inn gjennom dørene, som bidrar til bedret termisk komfort og mindre behov for romoppvarming.

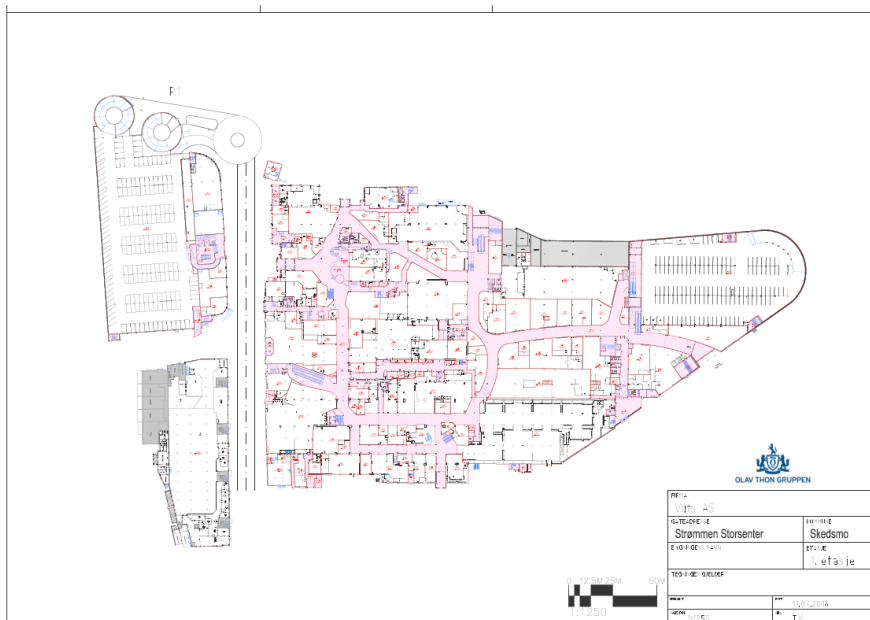
Sammenligning av S1 og S2 viser at luftmengdene gjennom inngangene blir mindre ved struping av avtrekk. Etter tetting av taket, viser sammenligning av S3 og S4 at struping av avtrekk bidrar til et såpass stort overtrykk at luftmengdene ut av bygget er større enn luftmengdene inn i bygget ved balansert ventilasjon.

Hypotesen viser seg å stemme, da det er tilfellet med tett tak og balansert ventilasjon (S4) som kom best ut av alle de simulerte tilfellene, med en total årlig energibesparelse på 939374,1 kWh.

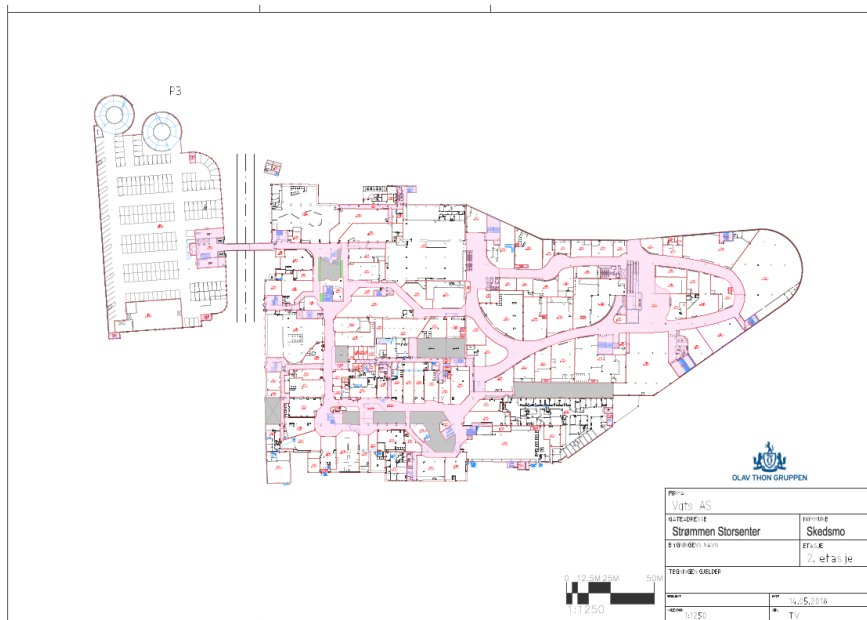
Referanser

- [1] Meteorologisk Institutt, eKlima. Hentet 4. april 2019 fra <http://eklima.met.no>.
- [2] Olav Thon Gruppen, Kjøpesentre. Hentet 21. November 2018 fra <http://www.thoneiendom.no/kjopesenter/>.
- [3] M. V. Axel Bring, Per Sahlin. *Models for Building Indoor Climate and Energy Simulation*, 1999.
- [4] I. Bryn and A. Bjørnulf. *Glass i Fasader og Lufttetthet*, 2015.
- [5] I. Bryn and P. A. Schiefloe. *Atrium Models for the Analysis of Thermal Comfort and Energy Use*. SINTEF Energy, Trondheim, Norge, 1996.
- [6] Byggforskserien. Varmegjenvinnere i ventilasjonsanlegg. Hentet 15. Mars 2019 fra https://www.byggforsk.no/dokument/537/varmegjenvinnere_i_ventilasjonsanlegg.
- [7] I. ICE. Hentet 15. Februar 2019 fra <https://www.equa.se/en/ida-ice>.
- [8] N. Karlsson. *Air Infiltration through Building Entrances*. Master's thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2013.
- [9] SINTEF. Fukt i bygninger. Teorigrunnlag. Byggforsk 421.132. Hentet 18. Februar 2019 fra https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag.
- [10] O. B. Stampe. *Ventilationsteknik*. Danvak ApS, Lyngby, Danmark, 2000.
- [11] G. e. a. Yuill. *Impact of high use automatic doors on infiltration*. Final report, 1999.

A Plantegninger av Strømmen Storsenter



Figur A.1: Plantegning, 1 etasje Strømmen Storsenter



Figur A.2: Plantegning, 2 etasje Strømmen Storsenter

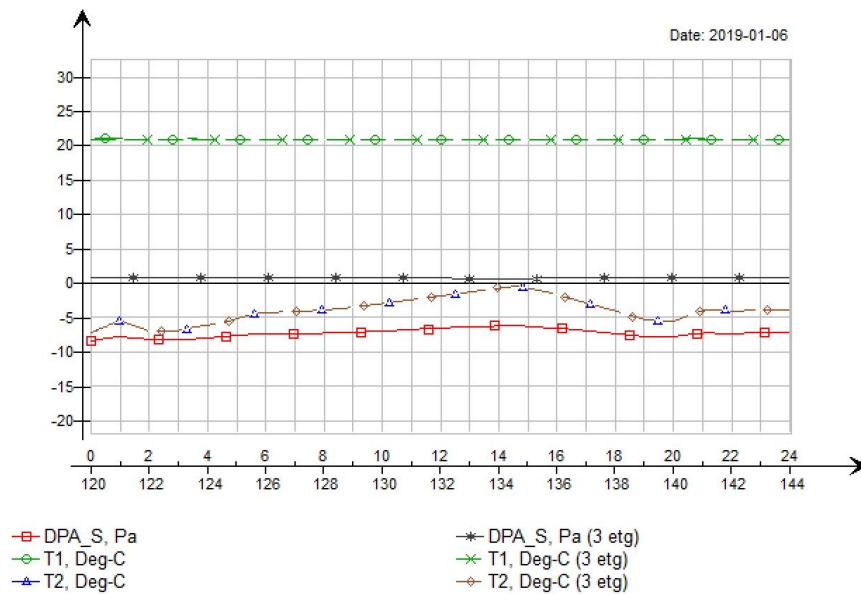
B Totale passeringer gjennom inngangene

Tabell B.1: Totalt antall mennesker som passerte gjennom inngangene 15 januar 2019.

Tid	Antall [PPH]
09.00	486
10.00	1273
11.00	1475
12.00	1547
13.00	1436
14.00	1535
15.00	1584
16.00	1512
17.00	1728
18.00	1525
19.00	1207
20.00	709
21.00	85

C Resultater fra simuleringer med lavere luftmengde

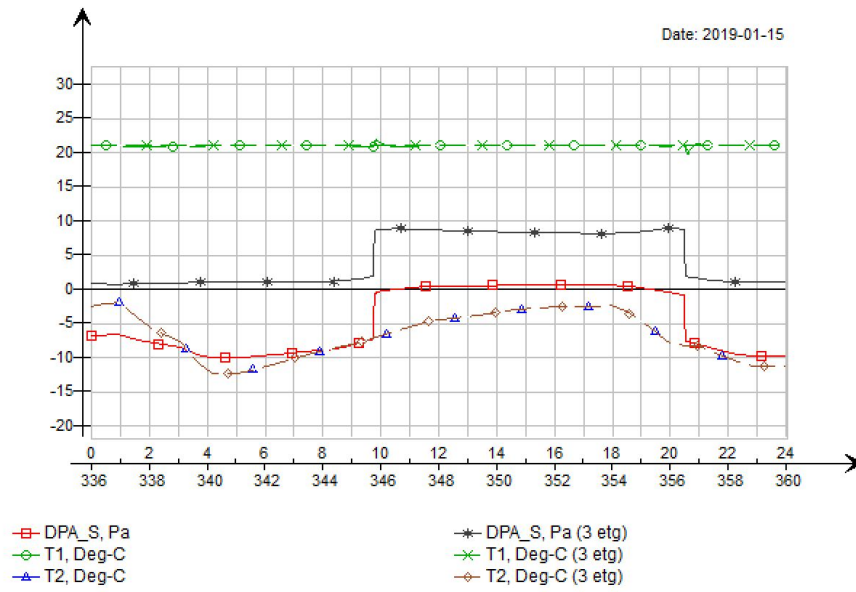
C.1 Dagens situasjon



Figur C.1: Trykkforskjell simulert i IDA ICE 6. januar 2019

Tabell C.1: Ventilasjonsluftmengder for simulering med ubalansert ventilasjon.

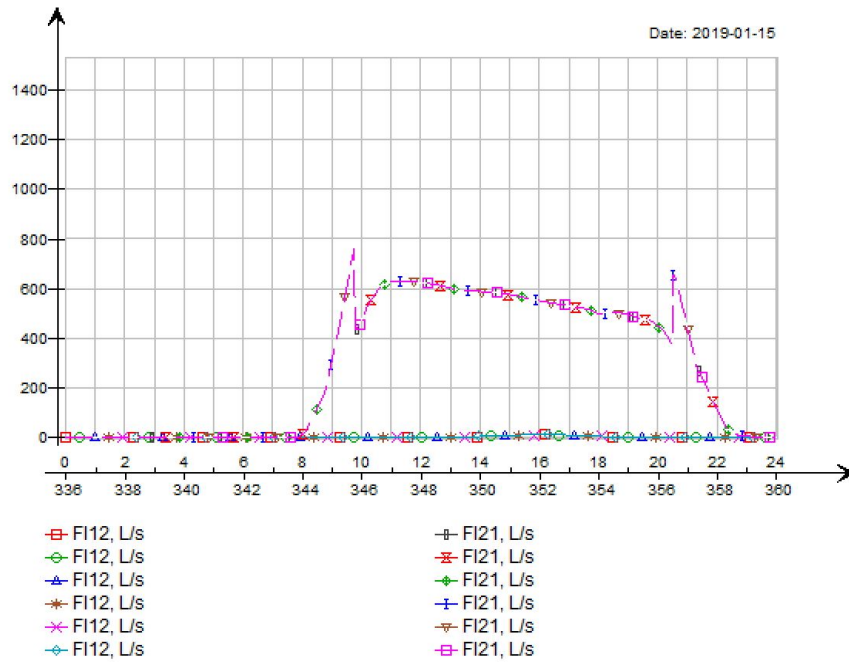
	min	max
Tilluft [$\frac{L}{m^2s}$]	1	8
Avtrekk [$\frac{L}{m^2s}$]	0,3	7



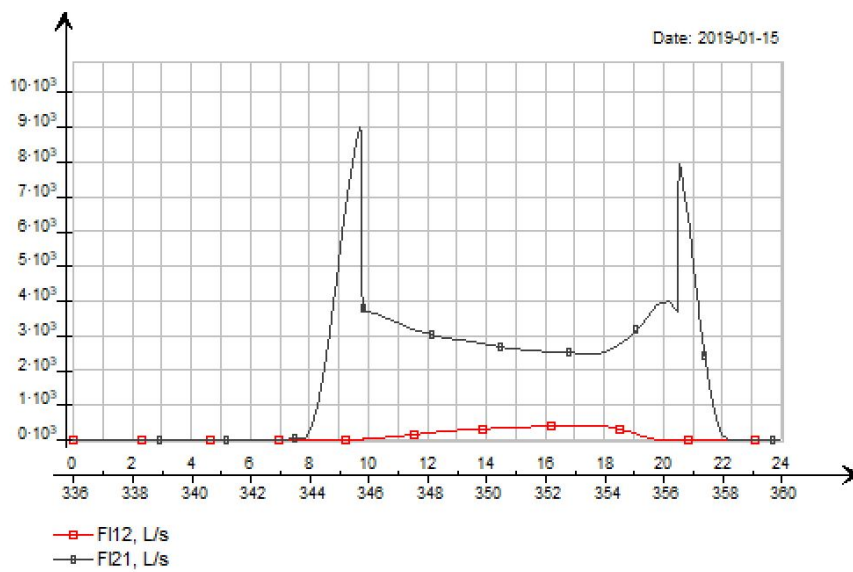
Figur C.2: Trykkforskjell simulert i IDA ICE 15. januar 2019

Tabell C.2: Energibehov, dagens situasjon.

Energipost	Energibehov [$\frac{kWh}{\ddot{a}r}$]	Spesifikt energibehov [$\frac{kWh}{m^2\ddot{a}r}$]
Romoppvarming	1.661.674,0	54,6
Ventilasjonsoppvarming	2.367.065,5	77,7
Sum	4.028.739,5	132,3



Figur C.3: Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, dagens situasjon.

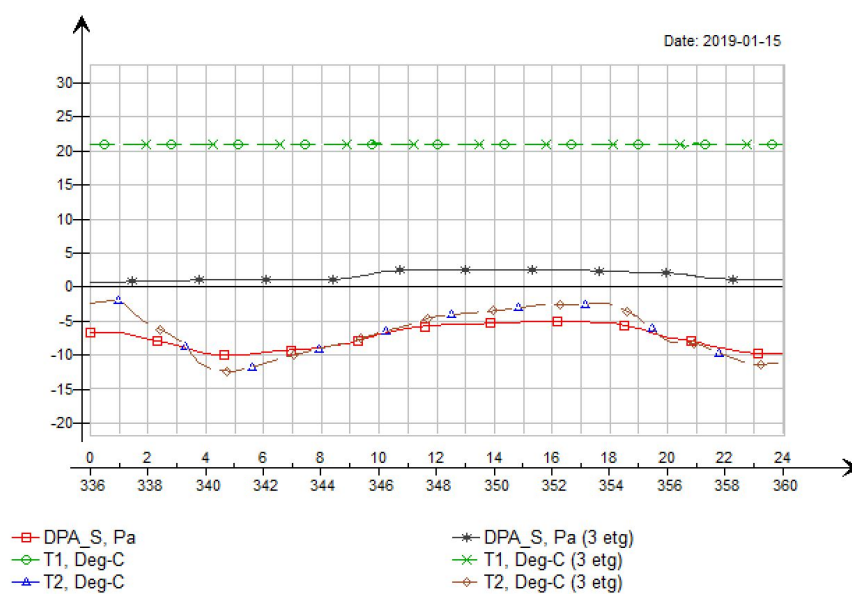


Figur C.4: Luftmengder inn gjennom èn dør som står helt åpen, dagens situasjon.

C.2 Balansert ventilasjon

Tabell C.3: Ventilasjonsluftmengder for simulering med balansert ventilasjon.

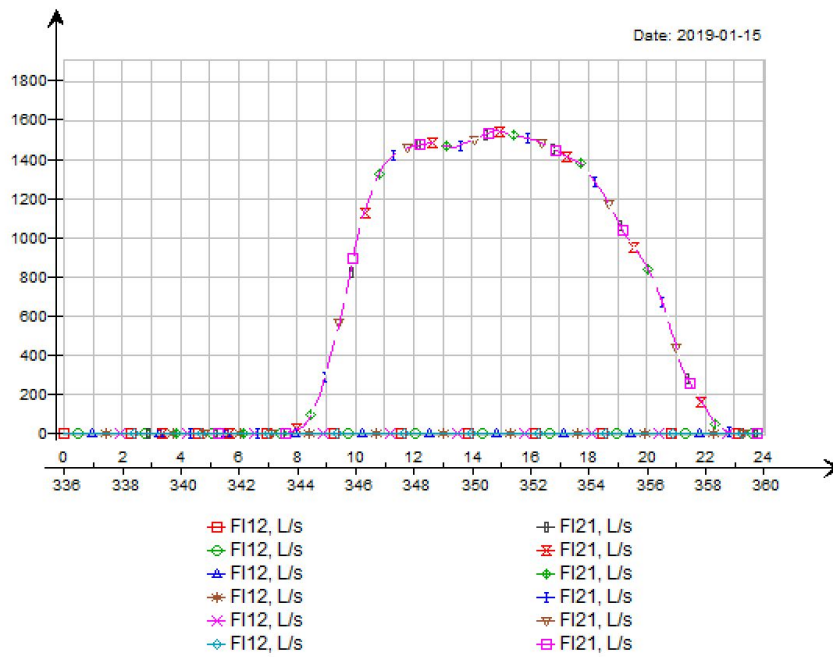
	min	max
Tilluft [$\frac{L}{m^2 \cdot s}$]	1	8
Avtrekk [$\frac{L}{m^2 \cdot s}$]	1	8



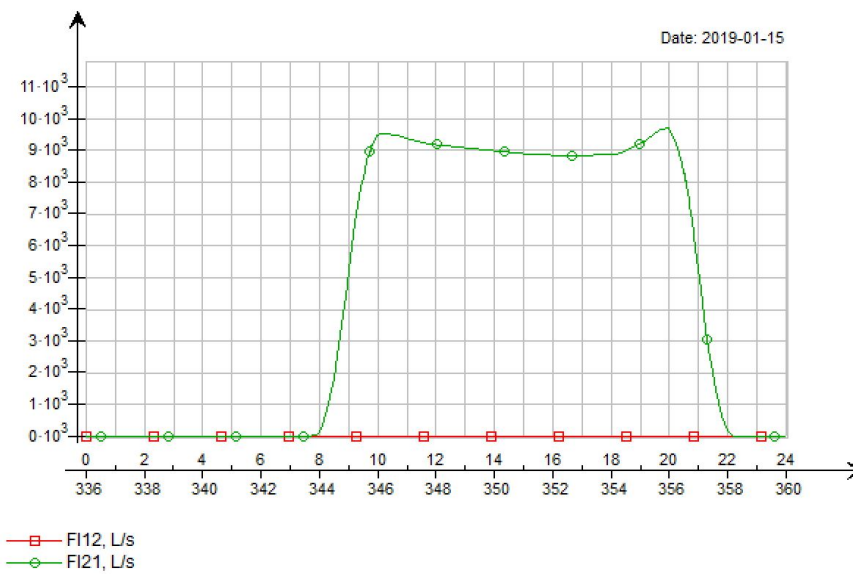
Figur C.5: Trykkforhold ved balansert ventilasjon.

Tabell C.4: Energibehov, balansert ventilasjon i dagens bygg.

Energipost	Energibehov [$\frac{kWh}{\text{år}}$]	Spesifikt energibehov [$\frac{kWh}{m^2 \cdot \text{år}}$]
Romoppvarming	2.160.735,0	71,0
Ventilasjonsoppvarming	1.238.853,5	40,7
Sum	3.399.588,5	111,7

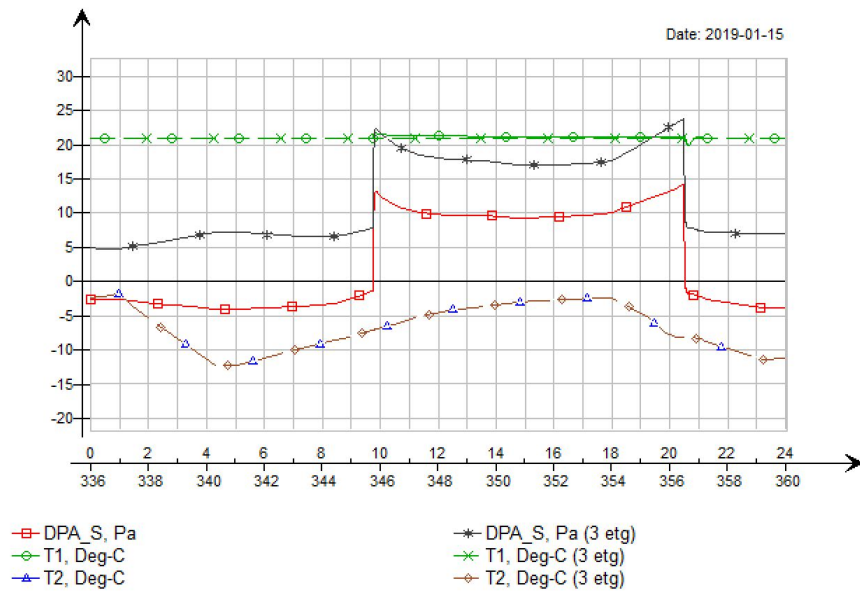


Figur C.6: Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved balansert ventilasjon.



Figur C.7: Luftmengder gjennom en dør som står helt åpen, ved balansert ventilasjon.

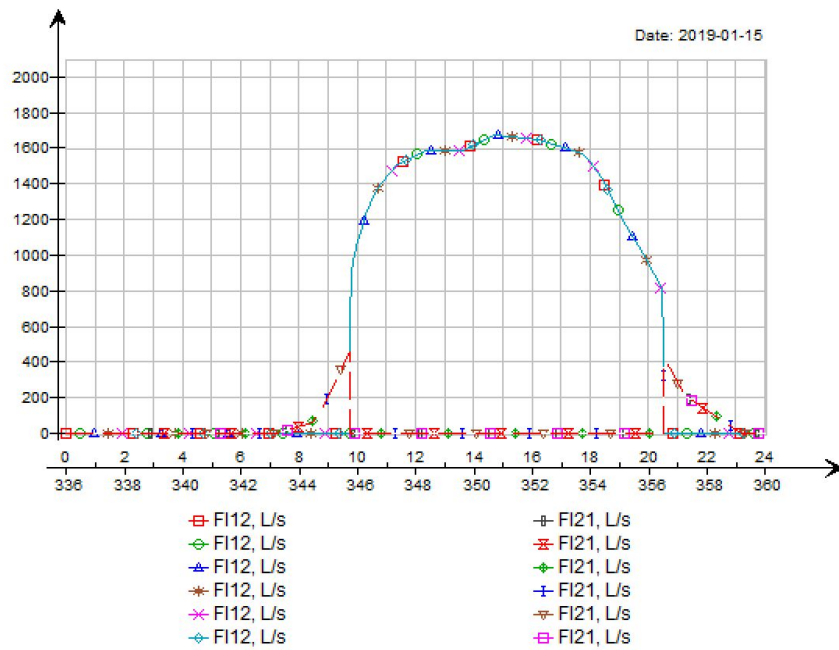
C.3 Tiltak: Tetting av tak, samme ventilasjon



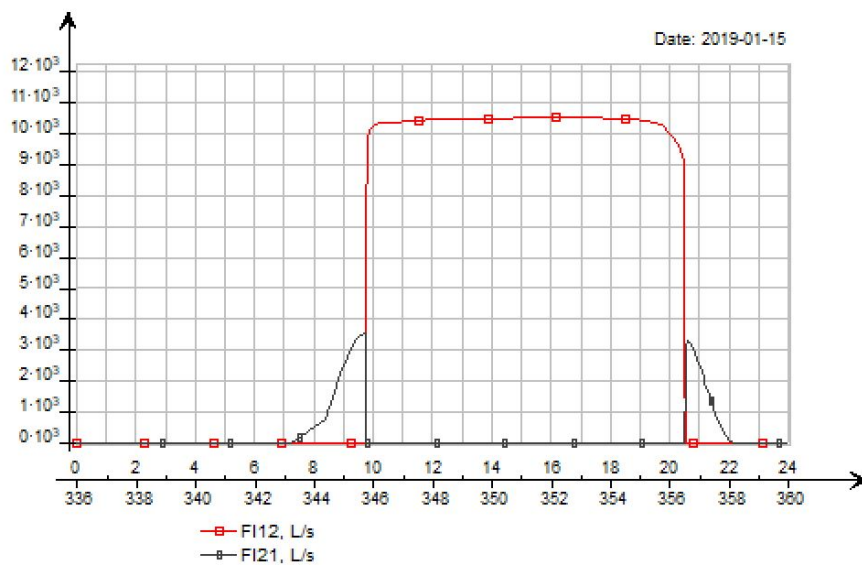
Figur C.8: Trykkforskjell ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.

Tabell C.5: Energibehov ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.

Energipost	Energibehov [$\frac{kWh}{\ddot{a}r}$]	Spesifikt energibehov [$\frac{kWh}{m^2\ddot{a}r}$]
Romoppvarming	988.820,0	32,5
Ventilasjonsoppvarming	2.366.988,5	77,7
Sum	3.355.808,5	110,2

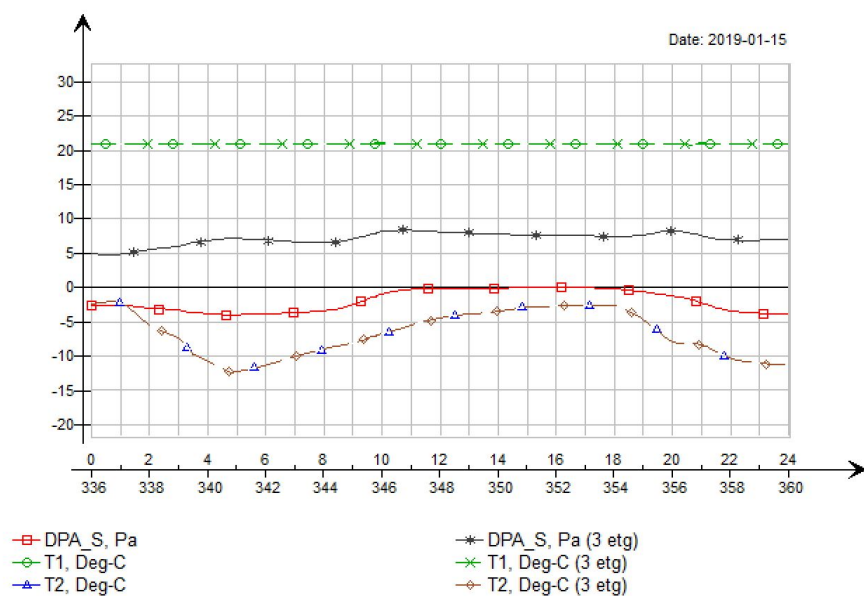


Figur C.9: Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.



Figur C.10: Luftmengder gjennom en dør som står helt åpen, ved tetting av tak og ventilasjon som i dag.

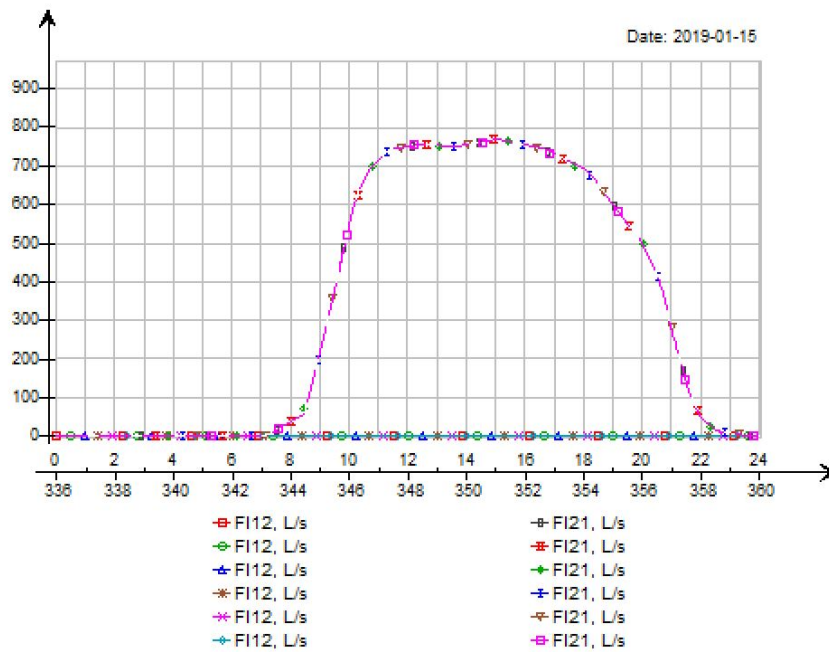
C.4 Tiltak: Tetting av tak, balansert ventilasjon



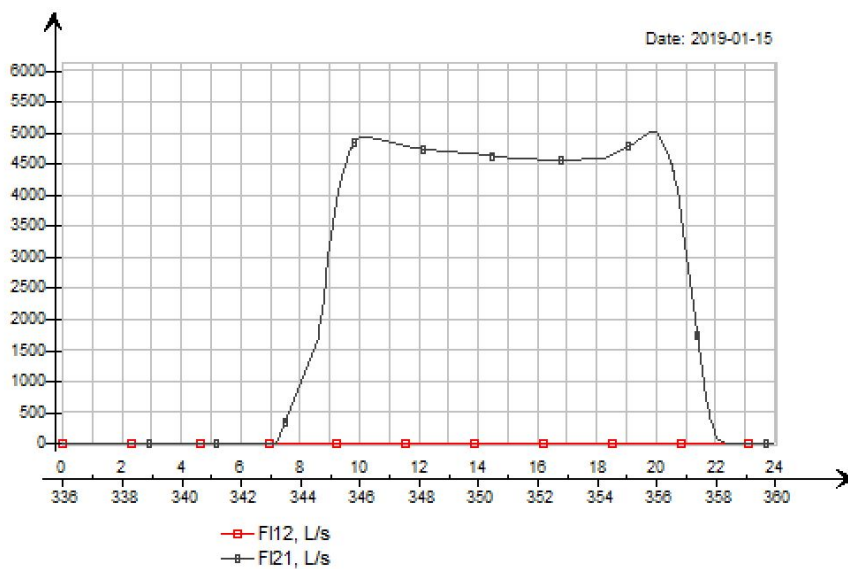
Figur C.11: Trykkforskjell ved tetting av tak og balansert ventilasjon.

Tabell C.6: Energibehov ved tetting av tak og balansert ventilasjon.

Energipost	Energibehov [$\frac{kWh}{\ddot{a}r}$]	Spesifikt energibehov [$\frac{kWh}{m^2\ddot{a}r}$]
Romoppvarming	1.253.354,0	41,2
Ventilasjonsoppvarming	1.223.382,2	40,2
Sum	2.476.736,2	81,4



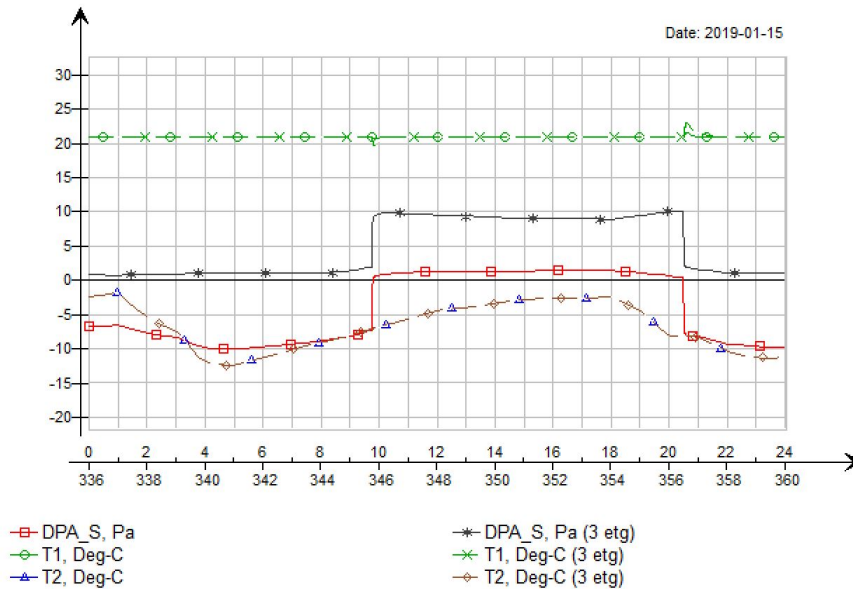
Figur C.12: Gjennomsnittlige luftmengder gjennom dører, ved tetting av tak og balansert ventilasjon.



Figur C.13: Luftmengder gjennom én dør som står helt åpen, ved tetting av tak og balansert ventilasjon.

D Resultater ved bruk av for lav tilluftstemperatur

D.1 Trykkforhold



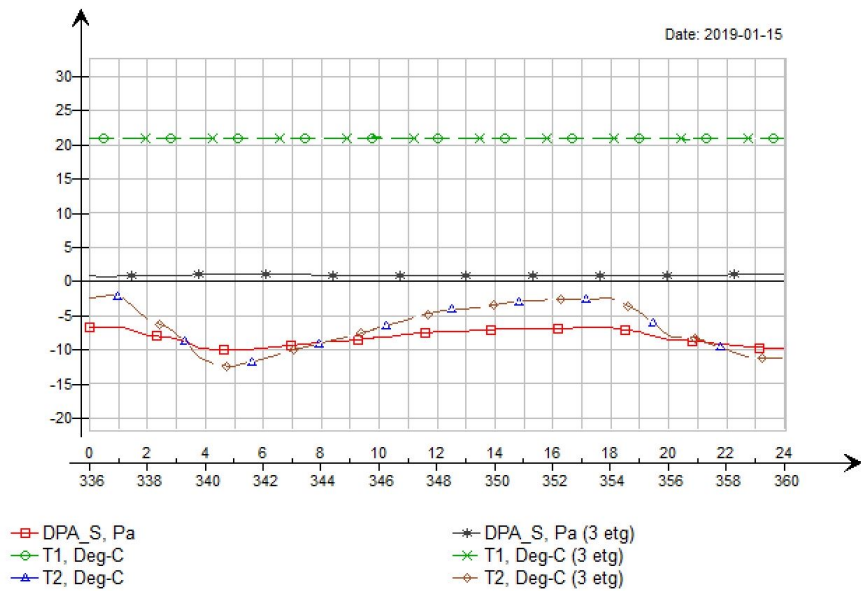
Figur D.1: Trykkforhold ved for lav tilluftstemperatur (18°C) 15. januar 2019.

D.2 Energibehov

Tabell D.1: Energibehov bruk av for lav tilluftstemperatur (18°C)

Energipost	Energibehov [$\frac{kWh}{\ddot{a}r}$]	Spesifikt energibehov [$\frac{kWh}{m^2\ddot{a}r}$]
Romoppvarming	7.743.492,0	254,3
Ventilasjonsoppvarming (Totalt)	3.728.404,7	57,4
Ventilasjonsoppvarming (Arealvektet for fellesområder)	1.746.617,8	57,4
Sum	9.490.109,8	311,7

E Trykkforhold 15. januar med balansert ventilasjon og lukkede dører



Figur E.1: Trykkforhold ved balansert ventilasjon og lukkede dører 15. januar 2019.