



OsloMet – storbyuniversitetet

Institutt for Bygg- og energiteknikk – Energi og miljø i bygg

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

GRUPPE NR. 10

TILGJENGELIGHET

Åpen

Telefon: 67 23 50 00

www.oslomet.no

MASTEROPPGAVE

MASTEROPPGAVENS TITTEL	DATO
Kvantifisering av luftmengder ved lufttetthetsmålinger i bygg ved bruk av ventilasjonsaggregat	23.05.18
	ANTALL SIDER / ANTALL VEDLEGG
FORFATTERE	VEILEDER
Marie Smidt	Dimitrios Kraniotis Peter G. Schild

UTFØRT I SAMMARBEID MED	KONTAKTPERSON
OsloMet – storbyuniversitetet	Marie Smidt

SAMMENDRAG
<p>Lufttettheten til et bygg er et uttrykk for hvor mye luft som går gjennom klimaskjermen. TEK17 stiller krav om at lekkasjetall ikke skal overskride $0,6 \text{ h}^{-1}$ i boligbygg og $1,5 \text{ h}^{-1}$ i yrkesbygg. Lekkasjetallet beregnes ved å utføre lufttetthetsmålinger i bygget. Den vanligste metoden for å utføre slike målinger er å benytte en automatisert vifte (blower door), men i denne oppgaven er det sett på muligheten ved å utføre en slik måling ved å benytte byggets ventilasjonsaggregat. Målingene er utført på WANG Ung, som er en ny ungdomsskole som ferdigstilles i juni 2018. Det ble her målt referansetrykk og trykkdifferanse i 1. og 4. etasje.</p> <p>Resultatene fra målingen ble behandlet etter ISO 9972, som er den gjeldende standarden for lufttetthetsmålinger i Norge. Trykkdifferansen som ble oppnådd var en del lavere enn minstekravet angitt i standarden, men ved ekstrapolering av beregnet kraftlikning var det likevel mulig å oppnå et pålitelig resultat for nødvendig luftmengde og lekkasjetall ved 50 Pa. Det er i tillegg utarbeidet en anvisning som skal fungere som metode for målingene og som et tillegg til ISO 9972. Ut fra resultatene oppnådd i studien kan en konkludere med at metoden fungerer, men at den krever erfaring og kompetanse.</p>

3 STIKKORD
Infiltrasjon
Lufttetthetsmålinger
AHU, ventilasjonsaggregater

Prosjektbeskrivelse

Tittel: Kvantifisering av luftmengder ved lufttetthetsmålinger i bygg ved bruk av ventilasjonsaggregat

Veileder: Oppgaven skrives i samarbeid med OsloMet – storbyuniversitetet med Dimitrios Kraniotis som hovedveileder og Peter G. Schild som biveileder.

Bakgrunn: Luftinfiltrasjon er ukontrollerte eller uønskede luftlekkasjer av uteluft gjennom klimaskjermen og sier noe om en bygnings lufttetthet. Studier viser at infiltrasjon står for ca. 15-30% av energibruken til oppvarming og/eller kjøling i en vanlig toetasjes enebolig ved normal lufttetthet. For å beregne lufttettheten utføres lufttetthetsmålinger ved å trykksette bygget med enten over- eller undertrykk, hvor den vanligste metoden er å benytte en automatisert vifte av typen blower door. Slike vifter har begrenset med kapasitet og ved lufttetthetsmåling i store bygg kreves ofte flere vifter eller at bygget deles opp i flere soner. Ved god lufttetthet vil det være mulig å oppnå et lavt lekkasjetall, n_{50} , og iht. kravet i TEK 17 skal ikke lekkasjetallet overskride $0,6 \text{ h}^{-1}$ for boligbygg og $1,5 \text{ h}^{-1}$ for yrkesbygg.

Hensikt: Hensikten med oppgaven er å konkretisere en metode for hvordan ventilasjonsaggregatet i et bygg kan benyttes for å trykksette bygget. Nødvendig luftmengde og tilhørende lekkasjetall skal beregnes for å kunne konkludere med at metoden er pålitelig. I tillegg skal det utarbeides en anvisning som skal fungere som metodebeskrivelse og som tillegg til NS-EN ISO 9972.

Metode: Målingene skal utføres på WANG Ung, som er en ny ungdomsskole som skal ferdigstilles i slutten av juni 2018. Lufttetthetsmålingene skal utføres i øverste og nederste etasje og trykkdifferansen bestemmes ved å regulere aggregatets turtall. I tillegg skal det måles referansetrykk både før og etter lufttetthetsmålingene. Resultatene som fremkommer av målingene skal bearbeides etter metode angitt i NS-EN ISO 9972 for å kunne beregne nødvendig luftmengde og lekkasjetall ved en trykkdifferanse på 50 Pa.

Måleutstyr: Metoden krever et ventilasjonsaggregat med tilstrekkelig kapasitet til å trykksette hele bygget. I tillegg kreves minst to trykkmålere for å måle trykkdifferanse over fasade og trykk og luftmengde i aggregat, termometer for å måle inne- og utetemperatur og temperatur i aggregat og teip for å kunne tette uønskede åpninger i klimaskjermen.

Forord

Høsten 2016 bestemte jeg meg for å bytte yrkesretning fra bygningsingeniør til ingeniør innen energi og miljø i bygg og flytte fra Bergen til Oslo. Etter to år ved masterstudiet Energi og Miljø i bygg ved OsloMet – storbyuniversitetet leverer jeg nå masteroppgaven min, som markerer slutten på studietiden i Oslo. Til høsten venter arbeidslivet og det skal bli fint å få praktisere kunnskapen jeg har tilegnet meg i løpet av disse årene.

Det har vært en krevende masteroppgave, men med hjelp fra gode støttespillere er jeg endelig i mål. Først av alt vil jeg takke min veileder Dimitrios Kraniotis for god veiledning og støtte. I tillegg vil jeg takke min biveileder, Peter G. Schild, som sammen med Dimitrios har tatt seg tid til å være med på feltmålinger og bidratt med mye kunnskap. Videre vil jeg takke Øystein Andersen og Ernst Erik Hempel fra OsloMet – storbyuniversitetet for både praktisk og faglig hjelp. En stor takk rettes også til Tore Brekken Riise, Roger Mariåsen og Tom Farstad ved AF Gruppen som har latt oss utføre målinger på WANG Ung og stilt opp med nødvendig informasjon. I tillegg vil jeg takke serviceteknikker fra Bjerke ventilasjon for god hjelp under lufttetthetsmålingen. Takk til SINTEF for lån av bilder.

Til slutt vil jeg takke Elina Våge Sørbotten som har vært min viktigste støttespiller. Vi har delt mye frustrasjon og glede gjennom denne våren, og sammen har vi nå fullført masterstudiet.

Marie Smidt

Oslo, 23. mai 2018

Sammendrag

Lufttettheten til et bygg er et uttrykk for hvor mye luft som går gjennom klimaskjerm, og har stor påvirkning på byggets energibehov. Et bygg med god lufttetthet vil oppnå et lavt lekkasjetall, n_{50} , mens et bygg med dårlig lufttetthet vil få et høyt lekkasjetall. Etter dagens krav i TEK17 skal ikke lekkasjetallet overskride $0,6 \text{ h}^{-1}$ for boligbygg og $1,5 \text{ h}^{-1}$ for yrkesbygg. Lekkasjetallet defineres som målt luftlekkasje i m^3/h dividert på byggets innvendige volum og er en viktig verdi som benyttes ved energiberegninger. For å beregne et byggs lekkasjetall utføres lufttetthetsmålinger ved å trykksette bygget med over- og/eller undertrykk. Den vanligste metoden for å utføre en slik måling er å benytte en automatisert vifte (blower door), men i denne oppgaven er det sett på muligheten ved å utføre lufttetthetsmålinger ved å bruke byggets ventilasjonsaggregat. Dette er en metode som er lite utbredt og det er gjort få studier på området.

Lufttetthetsmålingene ble utført på WANG Ung, som er en ny ungdomsskole for idrett i Oslo. Bygget er i sluttfasen og skal være klart til overlevering i slutten av juni 2018. Før målingene startet ble bygget klargjort ved å tette alle uønskede åpninger som sluk, toalett og aggregat. Referansetrykk og trykkdifferanse over fasaden ble målt i både 1. og 4. etasje ved hjelp av trykkmåler. Referansetrykket måles uten at aggregatet er i gang og ble målt både før og etter trykkmålingene. Ved måling av trykkdifferanse over fasaden ble ventilasjonsaggregatet kjørt ved turtall fra 100%-40%. Turtallet ble redusert ved 10% ved hver måling, som resulterte i totalt syv målinger i hver etasje.

Resultatene fra målingene ble behandlet etter ISO 9972, som er den gjeldende standarden i Norge for lufttetthetsmålinger. Trykkdifferansene som ble oppnådd var en del lavere enn hva standarden angir som minstekrav, men ved ekstrapolering av beregnet kraftlikning opp til 50 Pa ble det likevel oppnådd et pålitelig resultat for nødvendig luftmengde og lekkasjetall. Det er beregnet nødvendig luftmengde og lekkasjetall for luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner og luftmengde gjennom dyse. I tillegg til kvantifisering av luftmengder er det utarbeidet en anvisning som fungerer som metode for lufttetthetsmålinger ved ventilasjonsaggregat og som et supplement til ISO 9972.

Ut fra resultatene kan en konkludere med at bruk av ventilasjonsaggregatet som trykkmetode er en praktisk metode med pålitelige resultat, men metoden krever erfaring og forståelse da det ikke alltid vil være mulig å oppnå kravene angitt i standarden.

Abstract

A buildings envelope leakage says something about the amount of air passing through the envelope and has a major impact on the energy consumption of the building. If the buildings envelope leakage is good a low air change rate, n_{50} , will be achieved. According to today's requirements in TEK17, the air change rate should not exceed $0,6 \text{ h}^{-1}$ for residential buildings and $1,5 \text{ h}^{-1}$ for commercial buildings. The air change rate is an important value in energy calculations. To estimate the envelope leakage air tightness measurements are performed by using the fan pressurization method. The most common method of performing such a measurement is to use an automated fan (blower door), but in this thesis the possibility of performing airtightness measurements using the building's air handling unit (AHU) have been considered.

The air tightness measurements were performed at WANG Ung, which is a new middle school for athletes in Oslo. The building is in its final construction phase and will be due to commissioning by the end of June 2018. Before the measurements started, the construction was completed by sealing all unintentional openings such as the shower drains, toilet and the air handling unit. Reference pressure and pressure differences across the façade were measured on the 1st and 4th floor using a pressure gauge. The reference pressure is measured before and after the air tightness measurement, with the AHU turned off. When measuring the pressure difference across the building envelope the air handling unit was operated with a fan power of 100%-40%. The fan power was reduced in increments of 10%, resulting in a total of seven measurements on each floor.

The results from the measurements were processed according to ISO 9972, which is the current standard in Norway for air tightness measurements. The pressure differences achieved were somewhat lower than the standard indicates as minimum requirements, but by extrapolation of the calculated power law up to 50 Pa, reliable result was obtained for the required airflow and air change rate. The required air flow is calculated for both airflow through the rotary heat exchanger and through the nozzle. In addition to quantifying air volumes, an instruction has been prepared that serves as a method of air tightness measurement with air handling units, and as an addition to ISO 9972.

Based on the results one can say that the air-handler fan pressurization method is a practical and reliable way to estimate envelope leakage in buildings. However, the method requires some experience as it will not always be possible to meet the requirements given in the standard.

Nomenklatur

AHU	Air handling unit
AIC	Air Infiltration Center
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAN/CGSB	Canadian General Standards Board Catalogue
ISO	International Organization for Standardization
ELA	Effective leakage area
EN	Europeisk Standard
prEN	Forløper til Europeisk Standard
NS	Norsk Standard, standard som er utviklet i Norge
NS-EN	Standard som er utviklet i Europa (CEN) og deretter fastsatt som Norsk Standard
NS-EN ISO	Standard som er utviklet parallelt i Europa (CEN) og internasjonalt (ISO), og deretter fastsatt som Norsk Standard
TEK17	Byggteknisk forskrift
VVS	Varme-, ventilasjon- og sanitærteknikk

Innhold

1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Hensikt.....	2
1.3 Problemstilling.....	2
1.4 Avgrensninger.....	3
2. Teori	4
2.1 Luftinfiltrasjon i bygninger.....	4
2.2 Drivkrefter som påvirker luftinfiltrasjon.....	6
2.2.1 Vindtrykk	6
2.2.2 Skorsteinseffekt	9
2.2.3 Mekaniske systemer	10
2.3 Lufttetthetsmålinger.....	11
2.3.1 Forskjellige mål for luftlekkasje	13
2.3.2 Lufttetthetsmåling med «blower door»	15
2.3.3 Lufttetthetsmåling med ventilasjonsanlegg, «State of the art»	16
2.4 Usikkerhet.....	18
2.5 Standarder.....	19
2.5.1 NS-EN ISO 9972	20
2.5.2 ASTM International, E779 – 10	21
2.5.3 CAN/CGSB-149.15 – 96	21
3. Metoder	30
3.1 Testbygningen, WANG Ung.....	30
3.2 Måleutstyr og måleområde.....	33
3.3 Forberedelser før testdagen.....	39
3.4 Gjennomføring.....	39
3.4.1 Forberedelser	39
3.4.2 Måling av referansetrykk	43
3.4.3 Lufttetthetsmåling	45
4. Resultater og diskusjon	46
4.1 Referansetrykk.....	46
4.2 Trykkdifferanse over klimaskjerm.....	47
4.3 Korrigering av luftmengde.....	49
4.3.1 Korrigering av luftmengde gjennom dyseinnløp	50

4.3.2	Korrigering av luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner	52
4.4	Luftlekkasjefraf.....	52
4.4.1	Lekkasjefraf for luftmengde gjennom dyseinnløp	53
4.4.2	Lekkasjefraf for luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner	55
4.4.3	Beregning av nødvendig luftmengde og lekkasjetall	57
4.5	Beregning av nødvendig luftmengde og lekkasjetall iht. ISO 9972.....	57
4.6	95% konfidensintervall	60
4.7	Feilkilder.....	60
5.	Konklusjon	62
6.	Litteratur	64
7.	Vedlegg	1
7.1	Plantegninger.....	1
7.2	Beregning av nødvendig luftmengde før måling.....	8
7.3	Målt referansetrykk.....	9
7.4	Trykkdifferanse over klimaskjerm.....	9
7.5	Trykkfall i ventilasjonsaggregat og statisk trykk i kanal	10
7.6	Luftmengder i ventilasjonsaggregat.....	11
7.7	Korrigering av luftmengde gjennom klimaskjerm	12
7.8	Beregning av luftstrømningskoeffisient, C_{env} , og lekkasjeeksponent, n	13
7.9	95% konfidensintervall	15
7.10	Beregning av lekkasjeeksponent, C_L	17
7.11	Beregning av luftmengden, q	18
7.12	Beregning av nødvendig luftmengde og lekkasjetall ved 50 Pa	18
7.13	Korrespondanse med Sapa bygningssystemer.....	19
7.14	Måleprotokoll, WANG Ung	20
7.15	Anvisning.....	38

Figurliste

Figur 1. Snitt av en bygning som viser potensielle lekkasjepunkter [19].	4
Figur 2. Trykkforskjell på vegg og tak grunnet vind [9].	7
Figur 3. Infiltrasjonsegenskaper [22].	8
Figur 4. (a) Skorsteinseffekt i et bygg med kun en etasje. (b) Skorsteinseffekt i bygg med flere etasjer og ingen internlekkasjer. (c) Skorsteinseffekt i bygg med mange etasjer og interne lekkasjer [28].	9
Figur 5. Trykkforskjell over vegg grunnet mekanisk avtrekk [9].	10
Figur 6. De forskjellige drivkreftenes påvirkning, fra venstre; vindeffekt, skorsteinseffekt og forbrennings- og ventilasjonseffekt [30].	11
Figur 7. Måleprinsipp ved trykkmetoden. Massebalanse i bygget [5].	12
Figur 8. Automatisert vifte/blower door [37].	15
Figur 9. Trykksetting med blower door. Lyseblå piler indikerer luft som trekkes ut via viften, røde piler indikerer eksfiltrasjon og mørkeblå piler indikerer infiltrasjon [38].	16
Figur 10. Inngang på WANG Ung. Fasade mot sørøst.	30
Figur 11. Sapa Vindu 1086 – innadslående høyisolert [44].	31
Figur 12. Sapa Dør 2086 – høyisolert [44].	31
Figur 13. Swema 3000.	34
Figur 14. DPM TT570SM.	34
Figur 15. Kobling mellom plastrør og plastslange.	35
Figur 16. TES 1312A Thermometer.	36
Figur 17. Tetningsteip.	36
Figur 18. Oversikt over måleområde i plan 1.	37
Figur 19. Oversikt over måleområde i plan 4.	38
Figur 20. Tetting av vask til venstre og tetting av toalett til høyre.	40
Figur 21. Tetting av rørføringer til venstre og tetting av dusjsluk i garderobe til høyre.	40
Figur 22. Tetting av spesialavtrekk. Punktavsug til venstre og avtrekkskap til høyre.	40
Figur 23. Teiping av filterkassett til venstre og montering av filterkassett i aggregat til høyre.	41
Figur 24. Værforhold i løpet av måleperiode.	42
Figur 25. Kobling av trykkmåler, DPM.	44
Figur 26. Montering av plastrør i dør i første etasje.	44
Figur 27. Plastslange på pall ved måling av referansetrykk i 1. etasje.	44
Figur 28. Montering av plastslange gjennom dør i 4. etasje.	44
Figur 29. Tvangsstyring av spjeld i kanalsystem.	45
Figur 30. Lekkasjegrav for måling 1, luftmengde gjennom dyseinnløp.	53
Figur 31. Lekkasjegrav for måling 2, luftmengde gjennom dyseinnløp.	54
Figur 32. Lekkasjegrav for måling 1, luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner.	55
Figur 33. Lekkasjegrav for måling 2, luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner.	56

Tabelliste

Tabell 1. Forhold mellom en bygnings lufttetthet, maks luftmengde og maks volum	2
Tabell 2. Veiledende verdier for terrengskjermingskoeffisientene e og f [7].....	6
Tabell 3. Dimensjonsløst vindtrykk [25].	8
Tabell 4. Krav til lufttetthet (m^3/m^3h)/(h^{-1}) i Byggeteknisk forskrift, i NS 3700/NS 3701 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger.....	12
Tabell 5. Oversikt over vanlige mål for luftlekkasje [5].	14
Tabell 6. Eksempel på beregning av målesikkerhet [5].....	19
Tabell 7. Utendørs lufttemperatur i forhold til byggets antall etasjer.	22
Tabell 8. Sammenlikning av typiske standarder for lufttetthetsmålinger	23
Tabell 9. Egenskaper for Sapa vindu og dør [44].	32
Tabell 10. Tetthetsklasser for vinduer og dører etter NS-EN 12207:2016 [45].....	32
Tabell 11. Tetthetsklasser for vinduer og dører etter NS-EN 12207:2000 [47].....	33
Tabell 12. Generelle spesifikasjoner for Swema 3000.....	33
Tabell 13. Generelle spesifikasjoner for DPM TT570SM.....	34
Tabell 14. Generelle spesifikasjoner for TES 1312A Thermometer	35
Tabell 15. Oversikt over værforhold i løpet av måleperiode.	42
Tabell 16. Målt referansetrykk.	47
Tabell 17. Målt og korrigert trykkdifferanse ved måling 1.	48
Tabell 18. Målt og korrigert trykkdifferanse ved måling 2.	48
Tabell 19. Korrigerede luftmengder gjennom dyseinnløp for måling 1 med tilhørende trykkdifferanse.	51
Tabell 20. Korrigerede luftmengder gjennom dyseinnløp for måling 2 med tilhørende trykkdifferanse.	51
Tabell 21. Korrigerede luftmengder gjennom roterende varmegjenvinner for måling1 med tilhørende trykkdifferanse	52
Tabell 22. Korrigerede luftmengder gjennom roterende varmegjenvinner for måling 2 med tilhørende trykkdifferanse.	52
Tabell 23. Beregnet verdi for lekkasjekoeffisient, C, og lekkasjeeksponent, n, iht. lekkasjograf. ...	56
Tabell 24. Nødvendig luftmengde og lekkasjetall beregnet etter lekkasjograf.....	57
Tabell 25. Beregnet verdi for lekkasjekoeffisient, C, og lekkasjeeksponent, n, iht. ISO 9972.	59
Tabell 26. Nødvendig luftmengde og lekkasjetall beregnet etter ISO 9972.	59
Tabell 27. 95% konfidensintervall for luftmengde gjennom dyseinnløp.	60
Tabell 28. 95% konfidensintervall for luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner.....	60

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Luftinfiltrasjon er ukontrollerte eller uønskede luftlekkasjer av uteluft gjennom klimaskjermen. Fra slutten av 1970-årene er det gjort flere studier som ser på sammenhengen mellom infiltrasjon og klimaskjermens lufttetthet og hvordan dette påvirker bygningens energibruk [1], [2]. Nyere studier av fiske hus viser at infiltrasjon står for ca. 15-30% av energibruken til romoppvarming (eller kjøling) i en vanlig toetasjes enebolig ved normal lufttetthet, men ved dårlig lufttetthet tilsvarer andelen ca. 30-50% [3]. I 2012 undersøkte Chen m. fl. [4] hvordan luftinfiltrasjon påvirker bruk av fjernvarme i boligbygg i Nord-Kina. Ut fra simuleringer ble det konkludert med at dersom byggets lekkasjetall reduseres fra $0,98 \text{ h}^{-1}$ til $0,5 \text{ h}^{-1}$ reduseres den totale energibruken av fjernvarme med 12,6 %.

Lufttetthetsmålinger er i hovedsak utviklet for å dokumentere at bygningens lekkasjetall tilfredsstiller krav gitt i TEK17 [5]. Kravet i TEK17 om luftlekkasjetall i småhus og boligblokk er nylig endret fra $2,5 \text{ h}^{-1}$ til $0,6 \text{ h}^{-1}$ [6] mens for yrkesbygg er kravet $1,5 \text{ h}^{-1}$ [7]. En vanlig metode for å måle lekkasjer i klimaskjermen til bygninger er å trykksette bygget med over- og undertrykk [8], hvor hensikten er å finne bygningens lekkasjetall, n_{50} . Lekkasjetallet defineres som målt luftlekkasje i m^3/h dividert på byggets innvendige volum [9]. Ved trykkdifferanse på 50 Pa over klimaskjermen angis ofte lekkasjetallet som luftvekslinger pr. time, h^{-1} . Ved trykksetting av en bygning er det vanlig å benytte en automatisert vifte (blower door). En blower door består av en kraftig, kalibrert vifte som er midlertidig forseglet til en utvendig døråpning [10]. For å oppnå ønsket trykkforskjell mellom inne og ute kan viften skape både over- og undertrykk og trykkdifferansen over fasaden varierer ofte fra 10-100 Pa, avhengig av hvilken standard som benyttes. Maks lufthastighet for en blower door med åpen vifte er satt til $9438 \text{ m}^3/\text{h}$ [10]. Den maksimale lufthastigheten kombinert med bygningens lufttetthet angir begrensinger for bygningens volum, se Tabell 1. I utgangspunktet vil det være mulig å benytte en automatisert vifte i høye bygninger og i bygninger med stort volum, men påkjenninger fra vind, skorsteinseffekt og den høye lufthastigheten medfører at metoden ikke velegnet i slike bygg [11].

Tabell 1. Forhold mellom en bygnings lufttetthet, maks luftmengde og maks volum

Lufttetthet, n50, h^{-1}	Maks luftmengde, Q, m^3/h	Volum, V, m^3
0,6	9438	15730
1	9438	9438
1,5	9438	6292
2,5	9438	3775,2
4	9438	2359,5

Det er tidligere gjort studier hvor en ser på bruken av bygningens ventilasjonsanlegg som en metode for å trykksette bygget [8], [11], [12], [13], [14] og [15]. Selv om dette er en metode som har vært kjent lenge er det likevel gjort få studier. En utfordring ved denne metoden er at det kan være vanskelig, evt. ikke mulig, å oppnå anbefalt trykk [12] [13]. I de to nevnte studiene ble det utført lufttetthetsmålinger i store, høye bygg og anbefalt trykk på 60 Pa (ASTM E779 [16] og CAN/CGSB-149.15-96 [17]) ble ikke oppnådd. I tillegg til lite litteratur finnes det også kun en standard som presiserer bruken av bygningens ventilasjonsanlegg som trykkmetode for å estimere lekkasjer i klimaskjermen, CAN/CGSB-149.15-96 [17].

1.2 Hensikt

Siden trykktesting med automatisert vifte ikke er egnet i store bygg er det i denne oppgaven valgt å se på trykktesting av bygg ved å bruke byggets ventilasjonsaggregat. Hensikten med oppgaven blir dermed å konkretisere en metode for hvordan en kan benytte ventilasjonsaggregatet til å trykkteste bygninger. Oppgaven skal resultere i en anvisning som skal fungere som en beskrivelse av metoden og som et supplement til den internasjonale standarden som benyttes i Norge ved lufttetthetsmålinger, NS-EN ISO 9972.

1.3 Problemstilling

Hvordan kan en kvantifisere luftmengder i løpet av en lufttetthetsmåling ved å bruke ventilasjonsaggregatet til å trykksette bygget?

I tillegg til problemstillingen er det flere delspørsmål som skal besvares:

- Er det mulig å oppnå nullstrømning, ΔP_0 , (zero flow) over klimaskjermen, evt. hvordan skal dette gjøres?
- Hvor skal trykkdifferanse måles over klimaskjermen og hvordan skal dette utføres?

- Hvilke usikkerheter finnes det og hvordan skal disse håndteres?

1.4 Avgrensninger

Denne rapporten utgjør halvparten av en større oppgave om lufttetthetsmålinger i bygg ved bruk av ventilasjonsanlegg. Oppgaven er fordelt på to studenter hvorav denne rapporten fokuserer på hvordan bygget skal klargjøres før en lufttetthetsmåling og hvordan referansetrykk og trykkdifferanse over fasade skal måles. Rapporten fokuserer i tillegg på hvordan nødvendig luftmengde og tilhørende lekkasjetall skal beregnes. Den andre oppgaven fokuserer på ventilasjonsaggregatet og måling av luftmengder og trykkfall i aggregatet.

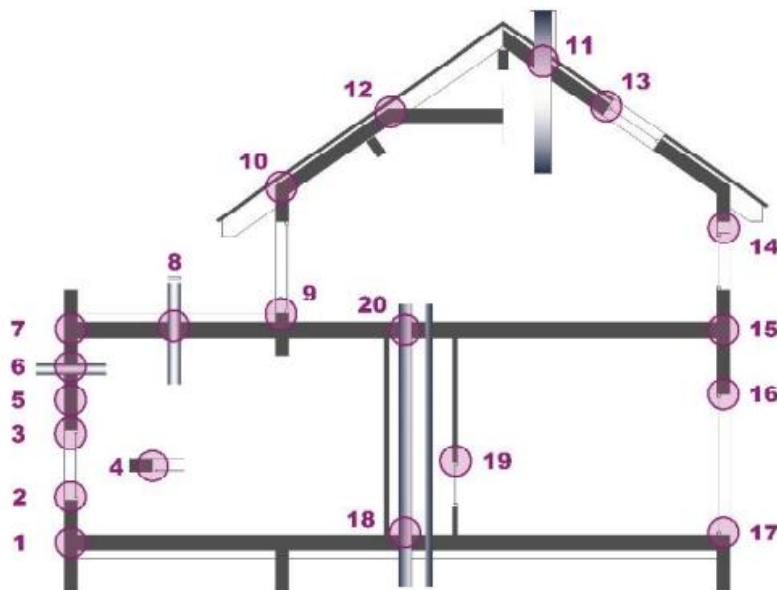
Anvisningen som er lagt ved som et vedlegg er utarbeidet av begge studentene for å skape en fullverdig metode for hvordan lufttetthetsmålinger skal utføres ved hjelp av et ventilasjonsaggregat.

2. Teori

2.1 Luftinfiltrasjon i bygninger

Infiltrasjon er en betegnelse på alle luftutskiftninger som skjer pga. utettheter i konstruksjonen. Ved infiltrasjon legges det vekt på at det er uteluft som trekkes inn i bygningen. Slike utettheter oppstår ofte i knutepunktet mellom forskjellige bygningselementer hvor det er skjøter i dampsperre og vindsperre. Andre aktuelle steder for utettheter er gjennomføringer, vinduer og dører. Figur 1 viser en oversikt over de mest vanlige lekkasjepunktene i en bygning.

Hensikten med en klimaskjerm er å skape en barriere mellom inne- og utemiljø for å sikre et godt inneklima. Høy infiltrasjon medfører ofte økt energibruk til oppvarming og kjøling, redusert termisk komfort grunnet ubehagelig trekk, høye radonkonsentrasjoner og forurensing som påvirker helsen. Infiltrasjon medfører også fare for fuktskader i konstruksjonen. I likhet med at luft trekkes inn i bygningen medfører også utetthetene at luft trekkes ut av bygningen, eksfiltrasjon. Ved eksfiltrasjon trekkes varm, fuktig inneluft gjennom sperresjiktet og videre utover i konstruksjonen, slik at det oppstår kondens [18].



Figur 1. Snitt av en bygning som viser potensielle lekkasjepunkter [19].

1. Knutepunkt mellom gulv i første etasje og vertikal vegg.
2. Knutepunkt mellom vinduskarm og vertikal vegg.
3. Knutepunkt mellom vindusutforing og vertikal vegg.
4. Knutepunkt mellom vindusutforing og vertikal vegg (horisontalt snitt)
5. Vertikal vegg (tverrsnitt).
6. Perforering av vertikal vegg.
7. Knutepunkt mellom øverste etasje og vertikal vegg.
8. Gjennomtrengning av gulv i øverste etasje.
9. Knutepunkt mellom fransk vindu og vertikal vegg.
10. Knutepunkt mellom skrått tak og vertikal vegg.
11. Gjennomtrengning av skrått tak.
12. Knutepunkt mellom skrått tak og møne.
13. Knutepunkt mellom skrått tak og vindu.
14. Knutepunkt mellom rullegardin og vertikal vegg.
15. Knutepunkt mellom mellomliggende gulv og vertikal vegg.
16. Knutepunkt mellom losholt til ytterdør og vertikal vegg.
17. Knutepunkt mellom ytterdørens karm og vertikal vegg.
18. Gjennomtrengning fra laveste etasje til krypkjeller.
19. Knutepunkt mellom servicesjakt og adgangsdør.
20. Knutepunkt mellom innvendig vegg og mellomliggende gulv.

Varmetapskoeffisienten for infiltrasjon er et resultat av luftens varmekapasitet per volum, luftskifte per time og bygningens volum. Den matematiske formelen er da gitt av følgende likning fra NS 3031 [7]:

$$H_{inf} = 0,33 * n_{inf} * V \quad [\text{W/K}] \quad (2.1)$$

hvor H_{inf} er varmetapskoeffisienten [W/K], faktoren $0,33$ er luftens varmekapasitet per volum [Wh/(m³*K)] og V er bygningens oppvarmede luftvolum [m³]. For å kunne beregne H_{inf} må først n_{inf} og n_{50} defineres. Lekkasjetallet n_{50} beskriver luftskifte per time, h⁻¹, ved en trykkforskjell på 50 Pa i bygget og er avhengig av bygningens volum og lekkasjeluftmengde, V_{50} , ved en trykkforskjell på 50 Pa [m³/h]. Ved beregning av lekkasjetall bør beregnet gjennomsnitt av lekkasjeluftmengde ved over- og undertrykk benyttes. Veiledende verdier for n_{50} er gitt i standard [7] eller beregnes etter følgende formel:

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (2.2)$$

Luftskifte for infiltrasjon påvirkes av massebalansen i bygget. I tilfeller hvor det er balansert ventilasjon i bygget vil tilluftsmengden, V_1 , og avtrekksluftmengden, V_2 , i det mekaniske ventilasjonsanlegget være lik. Som en følge av dette faller leddet med luftmengdene bort. Formelen er gitt i NS 3031 [7]:

$$n_{inf} = \frac{n_{50}e}{1 + \frac{f}{e} \left(\frac{V_1 - V_2}{V_{50}} \right)} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (2.3)$$

Faktorene e og f er terrengskjermingskoeffisienter som er gitt i tabell i standard [7], se Tabell 2.

Tabell 2. Veiledende verdier for terrengskjermingskoeffisientene e og f [7].

Koeffisient	Skjermingsklasse	Beskrivelse	Mer enn én utsatt fasade	Én utsatt fasade
e	Ingen skjerming	Bygninger i åpent landskap, høyblokker i bysentre	0,1	0,03
	Moderat skjerming	Bygninger på landet eller i forsteder med trær eller andre bygninger rundt	0,07	0,02
	Høy skjerming	Bygninger av middels høyde i bysentre eller i skogsområder	0,04	0,01
f	Alle klasser	-	15	20

2.2 Drivkrefter som påvirker luftinfiltrasjon

Luftinfiltrasjon i bygg drives av trykkforskjeller over fasaden. Det finnes tre drivkrefter bak denne trykkforskjellen: 1) vindtrykk, 2) oppdriftstrykk (skorsteinseffekt) og 3) trykk som er mekanisk generert fra ventilasjonssystemet [20]. Drivkreftene er diskutert nærmere i de følgende avsnittene.

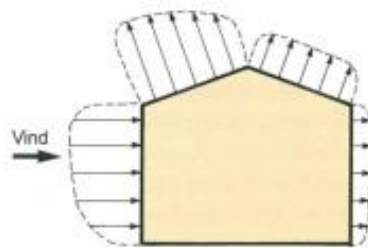
2.2.1 Vindtrykk

Det finnes flere faktorer som påvirker vindtrykket, blant annet: vindens egenskaper (for eksempel retning og hastighet), bygningens utforming, områdets topografi og omgivelsene [21]. Figur 2 viser

hvordan vindtrykket fordeler seg over fasaden. På losiden av bygget vil det oppstå positivt trykk som resulterer i infiltrasjon, mens det på tak og på lesiden vil oppstå negativt trykk, sug, som resulterer i eksfiltrasjon. Drivtrykk, ΔP , som følge av vind uttrykkes som følger:

$$P = C_p * (0,5 * \rho * U^2) \quad [\text{Pa}] \quad (2.4)$$

hvor P er over- eller undertrykk på lo- eller lesiden, C_p er trykkoeffisient på lo- eller leside, ρ er uteluftens densitet [$1,2 \text{ kg/m}^3$] og U er vindens hastighet [m/s] ved referansehøyden, som oftest byggets høyde. Trykkoeffisienten, C_p , er en parameter som er empirisk avledet som en funksjon av strømningsmønsteret rundet et bygg [22]. Trykkoeffisienten er vanligvis uavhengig av vindhastighet, men den påvirkes av vindens retning og hvordan vinden treffer bygget. Nærliggende hindringer som andre bygninger eller trær vil i tillegg kunne påvirke koeffisienten. Beregninger av C_p kan utføres ved målinger av bygget, men slike beregningsmodeller er basert på resultater fra vindlastprøver som er utført i vindtunneler. Her er byggene isolerte og det er ikke tatt hensyn til omliggende hindringer [22]. Det er mulig å lage egne modeller for spesifikke bygg med omliggende hindringer, men dette er dyrt og er derfor ofte ikke mulig. I sitt studie har Liddament [22] presentert data for trykkoeffisienter for en treetasjes bygning hvor det er tatt hensyn til takvinkel og skjerming rundt bygget. Det legges vekt på at disse dataene er resultater fra bibliografiske søk og fra AIC «workshop» om vindtrykksdata for luftinfiltrasjonskalkulasjoner [23]. Det nevnes at dataene kun skal betraktes som omtrentlige. Carrié og Leprince [24] benyttet i sin studie trykkoeffisienter inspirert av Liddament ved beregning av usikkerhet i bygg som følge av vind. Som en forenkling til målinger beskriver prEN 15242 [25] anbefalte verdier for C_p , se Tabell 3. Denne standarden er et forslag til standarden EN 15242, som nå er erstattet av NS-EN 16798-7:2017.

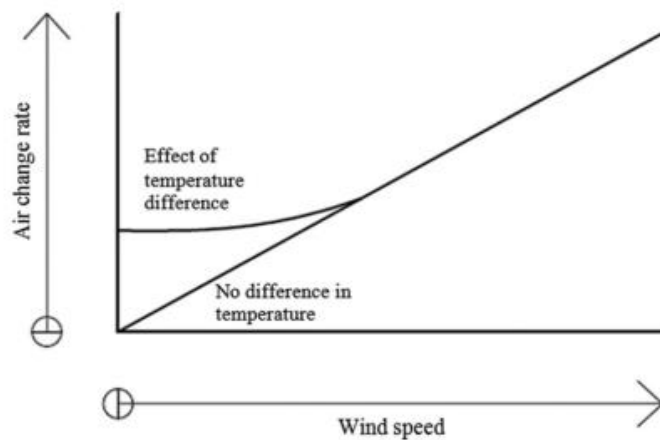


Figur 2. Trykkforskjell på vegg og tak grunnet vind [9].

Tabell 3. Dimensjonsløst vindtrykk [25].

Fasadedel	Skjerming	Dimensjonsløst vindtrykk, Cp				
		Losiden Cp1	Lesiden Cp2	Tak (avhengig av vinkel)		
				< 10°	10° - 30°	> 30°
Lav	Åpen	+ 0,50	- 0,70	- 0,7	- 0,6	- 0,2
	Normal	+ 0,25	- 0,5	- 0,6	- 0,5	- 0,2
	Skjermet	+ 0,05	- 0,3	- 0,5	- 0,4	- 0,2
Medium	Åpen	+ 0,65	- 0,7	- 0,7	- 0,6	- 0,2
	Normal	+ 0,45	- 0,5	- 0,6	- 0,5	- 0,2
	Skjermet	+ 0,25	- 0,3	- 0,5	- 0,4	- 0,2
Høy	Åpen	+ 0,8	- 0,7	- 0,7	- 0,6	- 0,2

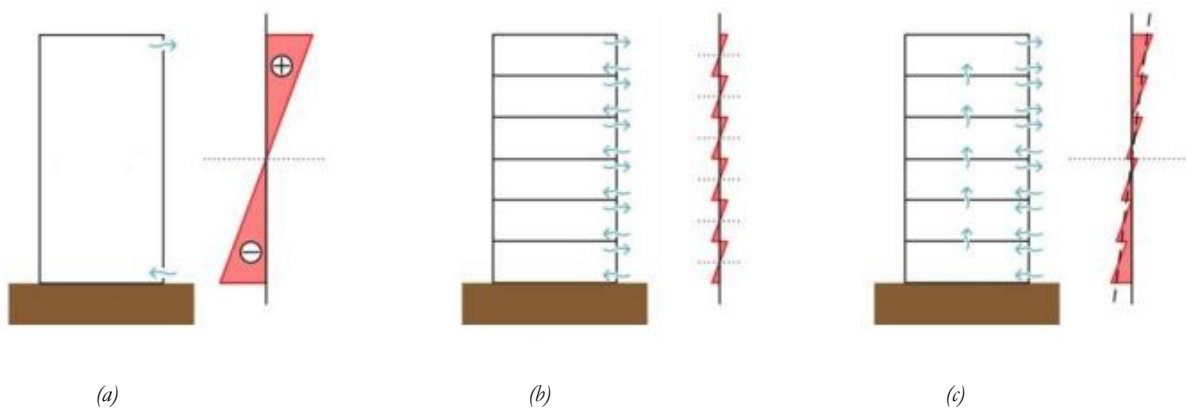
En utfordring med vinden er at den raskt skifter retning og hastighet. Det er derfor vanskelig å si noe om hvordan vindtrykket påvirker bygget. I tidligere studier [26] er det konkludert med at dersom vinden har en hastighet lavere enn 3,5 m/s vil skorsteinseffekten være den dominerende drivkraften. Samtidig konkluderes det med at dersom temperaturdifferansen mellom inne og ute er mindre enn 20 K og vindhastigheten er større enn 3,5 m/s vil vind være den dominerende drivkraften. I 1986 utviklet Liddament [22] en graf som beskriver hvordan luftskiftehastigheten påvirkes av vindhastighet og temperaturdifferanse, se Figur 3.



Figur 3. Infiltrasjonsegenskaper [22].

2.2.2 Skorsteinseffekt

Skorsteinseffekten avhenger i hovedsak av byggets høyde og temperaturdifferansen mellom inne og ute. Høye bygninger har større termisk oppdrift [27]. Siden varm luft har en lavere tetthet enn kald luft vil det oppstå termisk oppdrift i bygget, med overtrykk øverst og undertrykk nederst. Dette fenomenet oppstår oftest i løpet av vinterhalvåret hvor temperaturdifferansen er størst [10]. Dersom utetemperaturen er høyere enn innetemperaturen blir prosessen reversert. Som Figur 4(a) viser vil den termiske oppdriften skape en nøytralzone (stiplet linje). Hvor denne sonen oppstår avhenger av hvor i bygget luftlekkasjene finnes. Ved luftlekkasjer jevnt fordelt over byggets høyde vil nøytralsonen ofte være midt i bygget, men dersom den største andelen av utetthetene ligger lavt i bygget vil også nøytralsonen være lav. I Figur 4(b) er det vist en bygning med flere etasjer hvor det ikke finnes noe lekkasje mellom etasjene. Det mest realistiske tilfellet er vist i Figur 4(c) hvor det er internlekkasjer mellom etasjene og utettheter i klimaskjermen i hver etasje.



Figur 4. (a) Skorsteinseffekt i et bygg med kun en etasje. (b) Skorsteinseffekt i bygg med flere etasjer og ingen internlekkasjer. (c) Skorsteinseffekt i bygg med mange etasjer og interne lekkasjer [28].

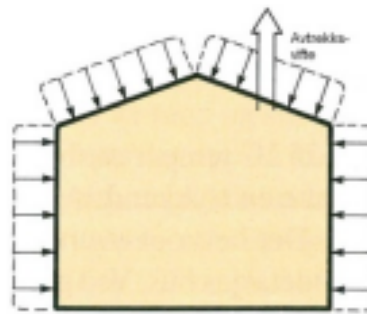
Grunnet små endringer i temperaturen i løpet av en dag vil trykkforskjellene i bygget, som følge av skorsteinseffekten, ofte være konstant. Sammenlignet med trykkforskjeller som følge av vind vil skorsteinseffekten være en mer konsistent drivkraft. Drivtrykk, ΔP , som følge av oppdrift uttrykkes slik:

$$\Delta P = \rho * g * z * \frac{(\theta_i - \theta_u)}{273 - \theta_m} \quad [\text{Pa}] \quad (2.5)$$

hvor g er tyngdeakselerasjonen [$9,81 \text{ m/s}^2$], z er byggets høyde [m], θ_i er lufttemperatur inne [$^{\circ}\text{C}$], θ_u er lufttemperatur ute [$^{\circ}\text{C}$] og θ_m er middeltemperaturen av inne og ute [$^{\circ}\text{C}$].

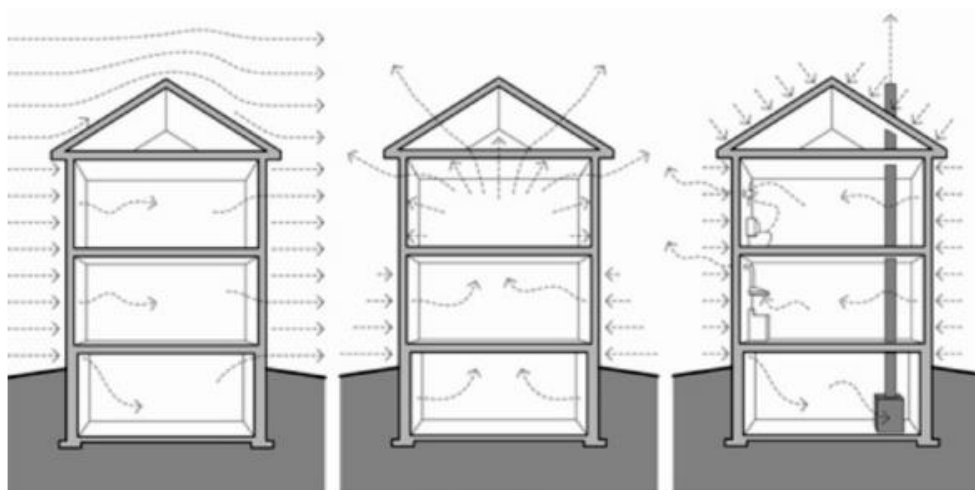
2.2.3 Mekaniske systemer

For å sikre et godt inn klima har alle bygg en form for mekanisk ventilasjon. Dette kan være i form av kjøkkenhetter, avtrekk på bad eller balansert ventilasjon. Felles for de to første alternativene er at de skaper trykkforskjeller som medfører strømning av luft i bygget. Bygninger som benytter denne type ventilasjon har ofte et lavere infiltrasjonsvarmetap enn bygninger med balansert ventilasjon. Grunnen til dette er at luften som kommer inn gjennom utettheter eller ventiler vil være en del av den nødvendige frisklufttilførselen [9]. Bygg med balansert ventilasjon påvirker ikke trykkforholdene, men dette er avhengig av at tilluftsmengden er lik avtrekksmengden. Størrelsen på trykkforskjellene avhenger av bygningstype og hvilket mekanisk system som benyttes. Figur 5 viser trykkforskjell over vegg som oppstår ved mekanisk avtrekk.



Figur 5. Trykkforskjell over vegg grunnet mekanisk avtrekk [9].

Ved beregning av drivkrefter ser en på en kombinasjon av trykkforskjeller forårsaket av vind, skorsteinseffekt og mekaniske systemer. Trykket fra alle drivkreftene legges sammen og deretter bestemmes en resulterende luftstrømningshastighet gjennom klimaskjermen [29]. Det er viktig å bestemme den resulterende hastigheten, fordi luftstrømningshastigheten gjennom en åpning ikke er relatert til trykkforskjellen. Figur 6 viser forskjellen mellom de forskjellige drivkreftene og hvordan de påvirker luftstrømninger gjennom klimaskjermen.



Figur 6. De forskjellige drivkreftenes påvirkning, fra venstre; vindeffekt, skorsteinseffekt og forbrennings- og ventilasjonseffekt [30].

2.3 Lufttetthetsmålinger

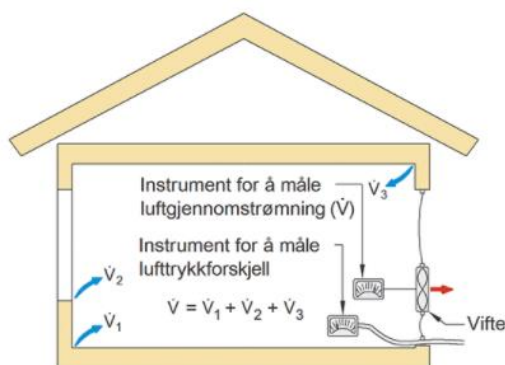
For å kontrollere at en bygning oppnår kravet om god lufttetthet utføres lufttetthetsmålinger. Lufttetthet kan defineres som måling av luftstrømmen gjennom en bygnings klimaskjerm som funksjon av trykket over fasaden [31]. Forholdet kan uttrykkes som en kraftlov:

$$V' = C \Delta P^n \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (2.6)$$

hvor V' er luftmengder [m^3/h], C er lekkasjekoeffisient [m^3/hPa], ΔP er trykkforskjell [Pa] og n er lekkasjeksponent [-]. Lekkasjekoeffisienten er et uttrykk for mengdene av luft som lekker inn i bygget og er summen av koeffisientene ved alle fasader. Lekkasjeksponenten bør ligge mellom 0,5-1,0 [17] [16]. For å oppnå massebalanse i bygget må den samme luftmengden som går gjennom viften også gå gjennom utettheter i konstruksjonen. I løpet av en lufttetthetsmåling vil massebalansen i bygget kunne skrives slik:

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (2.7)$$

hvor \dot{V} er summen av alle luftmengdene gjennom klimaskjermen, se Figur 7.



Figur 7. Måleprinsipp ved trykkmotoden. Massebalanse i bygget [5].

Lufttetthetsmålinger utføres i tillegg ofte for å finne riktig lekkasjetall som kan brukes ved energiberegninger [5], men det var først i 1982 at Byggeforskriften stilte krav til lekkasjetallet [9]. I ettertid har kravene blitt skjerpet to ganger, i 2007 og i 2016. I 2010 kom i tillegg *NS 3700 Kriterier for passivhus og lavenergihus Boligbygninger* [32], oppdatert i 2013, hvor det ble stilt egne krav til boligbygg avhengig av energiklasse. I tillegg til denne finnes det en egen standard for yrkesbygninger, *NS 3701 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger. Yrkesbygninger* [33]. Tabell 4 viser en oversikt over de forskjellige kravene. Tabellen er videreutviklet fra tabell i SINTEF rapport [9]. Siden kravene gitt i §14-2 i TEK17 [6] kan fravikes er det i tillegg satt et minimumskrav på $1,5 \text{ h}^{-1}$ ved 50 Pa for alle bygninger, unntatt boligbygg og fritidsbygg med laftede yttervegger. Dette kravet ble endret fra $3,0 \text{ h}^{-1}$ i TEK10.

Tabell 4. Krav til lufttetthet ($\text{m}^3/\text{m}^3\text{h}$)/ (h^{-1}) i Byggeteknisk forskrift, i NS 3700/NS 3701 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger.

Bygningstype	Frittliggende småhus	Rekkehus i inntil to etasjer	Andre bygninger	Yrkesbygninger
TEK 97	$\leq 4,0$	$\leq 3,0$	$\leq 1,5$	$\leq 3,0$
TEK 2007/2010	$\leq 2,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
TEK 2016/2017	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
Lavenergi klasse 1 - NS 3700	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	
Lavenergi klasse 2 - NS 3700	$\leq 3,0$	$\leq 3,0$	$\leq 3,0$	
Passivhus - NS 3700	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$	$\leq 0,6$	
Lavenergiklasse - NS 3701				$\leq 1,5$
Passivhus - NS 3701				$\leq 0,6$

Andre viktige grunner til å utføre lufttetthetsmålinger er:

- å kartlegge lekkasjer som kan påvirke energibehov til oppvarming og kjøling
- få oversikt over termiske forhold som kan gi redusert komfort
- få oversikt over interne luftlekkasjer mellom bruksenheter, som har betydning for brannspredning, radonkonsentrasjoner, forurensninger, lyd- og smitteoverføring
- få oversikt over eventuelle fuktskader.

2.3.1 Forskjellige mål for luftlekkasje

Det er ofte ønskelig å kunne sammenligne forskjellige bygningers lufttetthet og for å gjøre dette beregnes en normalisert verdi. Hvilken verdi som benyttes kan variere fra land til land, men i Norge er det vanlig å benytte lekkasjetallet, n_{50} , som beregnes etter formel (2.2). Det benyttes som en inngangsverdi ved energiberegninger og for å sammenligne med norske forskriftskrav. I tillegg til n_{50} benyttes ofte q_{50} som er luftlekkasjer i bygget. Denne verdien sier noe om hvor god klimaskjermen er, om den har god eller dårlig tetthet. I Danmark benyttes spesifikk lekkasjeluftmengde, w_{50} , som krav ved lufttetthetsmålinger. Felles for alle disse metodene er at de benytter V_{50} som utgangspunkt. Som tidligere nevnt angir V_{50} lekkasjeluftmengde i løpet av en time ved 50 Pa trykkforskjell. Canada benytter effektivt lekkasjeareal, som gir en visualisering av hvor store åpninger som finnes i byggets klimaskjerm. Tabell 5 er hentet fra Byggforskserien og gir en oversikt over de forskjellige målemetodene.

En fordel ved å benytte n_{50} er at den tar hensyn til hvor mye luftvolum som blir fortrent gjennom klimaskjermen i forhold til innvendig oppvarmet volum. Lekkasjetallet sier noe om antall luftvekslinger pr. time, og kan dermed gi en indikasjon på hvordan luftlekkasjene påvirker byggets energibruk. Dette er fordi det er det innvendige volumet som skal varmes opp (evt. kjøles ned), og ved høy utskiftning av luft vil dette bli problematisk. Dersom q_{50} benyttes som mål for luftlekkasjer vil resultatet være en faktor av arealet til testsonens klimaskjerm. Medregnet i dette arealet er areal av alle vegger, tak og guly, selv om de grenser mot andre soner. Denne målemetoden beskriver hvor mye luft som passerer gjennom hver m^2 av klimaskjerming ved trykksetting, og er dermed en indikasjon på hvor tett klimaskjermen er. Metoden sier lite om luftvolumet i testsonen i forhold til lekkasjeluftmengden. Spesifikk lekkasjeluftmengde, w_{50} , angir kun lekkasje i forhold til gulvets areal og det vil derfor være vanskelig å si noe om hvor stor lekkasjen er utover dette. En fordel med denne målemetoden er at den kan sammenlignes med krav gitt i TEK 17 [6]. Rammekravene er her oppført som $kWh/(m^2 \text{ oppvarmet BRA per år})$, noe som medfører at det vil være mulig å benytte w_{50} for å si noe om hvor mye luftlekkasjen har å si i forhold til kravene. I Canada uttrykkes

en bygnings totale lekkasje ofte som et ekvivalent eller effektivt område av en spesifikk åpning med samme luftstrøml lekkasje [34]. Det effektive lekkasjeområdet er arealet av et hull med utslippskoeffisient lik 1,0, som ved en gitt trykkforskjell, gjerne 4 Pa, lekker like mye som resten av bygningen [16]. Dette er også kjent som summen av utilsiktede åpninger i klimaskjermen (*ELA*, *effective leakage area*) og blir ofte brukt som et mål på fasadens tetthet [35] og beregnes etter følgende formel:

$$ELA = Q * \left(\frac{\rho}{2\Delta P}\right)^{0,5} \quad [m^2] \quad (2.8)$$

her uttrykker ΔP trykkforskjell over åpningen [Pa], Q er luftmengden [m^3/h] og $0,5$ er eksponent for store åpninger. Her benyttes ofte 10 Pa som referansetrykk. Det effektive lekkasjearealet kan da uttrykkes som ELA_{10} . Tabell 5 viser en oversikt over forskjellige mål for luftlekkasje.

Tabell 5. Oversikt over vanlige mål for luftlekkasje [5].

Enhet	Formel	Benevning	Kommentar
n_{50} Lekkasjetall	$\frac{\dot{V}_{50}}{\text{Oppvarmet volum}}$	h^{-1} eller oms/h	Lekkasjetallet benyttes ved energiberegninger som en inngangsverdi. Det benyttes også ved sammenlikning med forskriftskrav i Norge.
q_{50} Luftlekkasje	$\frac{\dot{V}_{50}}{\text{Klimaskjermens areal}}$	$m^3/(m^2h)$	Sier noe om konstruksjonens tetthet.
w_{50} Spesifikk lekkasjeluftmengde	$\frac{\dot{V}_{50}}{\text{Oppvarmet gulvareal}}$	$m^3/(m^2h)$	Brukes som kravnivå i Danmark.
ELA Effektivt lekkasjeareal	Arealet av en standardisert åpning med samme luftlekkasje som den målte bygningen ved angitt referansetrykk	m^2	Et uttrykk for klimaskjermens åpninger og deres størrelse ved hjelp av visualisering.

2.3.2 Lufttetthetsmåling med «blower door»

Ved lufttetthetsmålinger benyttes ofte viftetrykksmetoden. Denne metoden innebærer måling av den stabile luftstrømmen gjennom viften som trengs for å opprettholde en jevn trykkdifferanse over fasaden. Det finnes flere standarder [16], [17], [34], [36] og anvisninger [5], [37] som beskriver forberedelser, klargjøring, måling og rapportering ved lufttetthetsmåling av små og store bygninger. Som tidligere nevnt er trykksetting ved hjelp av en automatisert vifte den vanligste metoden for å utføre lufttetthetsmålinger, hvor blower door er den mest brukte viften, se Figur 8. En blower door består av tre komponenter: 1) en kalibrert vifte, 2) trykkmålingsinstrument (manometer) og 3) monteringsystem. Den kalibrerte viften har en variabel hastighet og kan indusere en rekke luftstrømmer som er tilstrekkelig for å oppnå ønsket over- og undertrykk ved forskjellige bygningsstørrelser. Manometeret måler trykkforskjellen over viften og fasaden som et resultat av den induserte luftstrømmen. Monteringsystemet brukes for å montere viften. Den monteres normalt i en døråpning. En slik vifte benytter databasert måleutstyr som kan logge volumstrøm og trykkforskjell iht. NS-EN ISO 9972 [36].



Figur 8. Automatisert vifte/blower door [37].

Hvor stor volumstrøm som må passere gjennom viften bestemmes ved å måle trykket ved en strømningssensor som er festet på motoren. Viften har en utløpside og en innløpside for å kunne skape over- og undertrykk. Innløpsiden består av flere kalibrerte ringer, som kan måle nøyaktig volumstrøm over et bredt spekter av strømningshastigheter. En trykktest utført med en blower door, se Figur 9, resulterer i en rekke viftehastighetsmålinger ved forskjellige bygningstrykk i en rekkevidde fra ca. 60-15 Pa [10], men bygningstrykkene kan være høyere.



Figur 9. Tryksetting med blower door. Lyseblå piler indikerer luft som trekkes ut via viften, røde piler indikerer eksfiltrasjon og mørkeblå piler indikerer infiltrasjon [38].

2.3.3 Lufttetthetsmåling med ventilasjonsanlegg, «State of the art»

Sammenlignet med lufttetthetsmåling med blower door er ikke målinger med bygningens ventilasjonsanlegg like utbredt. Den canadiske standarden, CGSB, er den eneste standarden som beskriver trykktestingsmetoden ved å bruke ventilasjonsanlegget, men det finnes tidligere studier som har benyttet denne metoden.

I 1973 gjorde Shaw m. fl. [14] et studie hvor de utførte lufttetthetsmålinger i fire forskjellige bygninger i Canada, hvor høyden varierte fra 9-20 etasjer. Alle etasjer mellom bakkenivå og teknisk etasje på toppen ble trykksatt. Det ble benyttet 100% uteluft som tilluft, ingen gjenvinning, og avtrekk- og avkastsystemene ble stengt. Tilluftshastigheten var varierende og den tilsvarende trykkdifferansen over fasaden ble målt og notert. Da forsøket ble utført var bygget tomt og det var lite eller ingen vind. Det ble i tillegg utført simuleringer av et lignende bygg og resultatene viser at det er samsvar mellom luftlekkasjene i begge tilfeller. Denne studien ble senere utvidet til å omfatte fire ekstra bygninger [39]. I 1991 ble det utført en ny test i seks av de åtte tidligere testede byggene for å se om lufttettheten hadde endret seg opp gjennom årene etter at fem av byggene var blitt rehabilitert [15]. Resultatene her viser at alle byggene som var blitt rehabilitert hadde oppnådd bedre lufttetthet, mens bygget som ikke var rehabilitert hadde fått dårligere lufttetthet. Alle studiene benyttet samme metode.

I 1998 utførte Bahnfleth m. fl. lufttetthetsmålinger i et universitetsbibliotek på 12 077 m² med seks etasjer og i en yrkesbygning på 270 000 m² med 64 etasjer [8]. Hensikten med studien var å utvikle en metode for å evaluere klimaskjermens lufttetthet ved høye bygg. Denne metoden skulle representere det beste kompromisset mellom enkelhet og nøyaktighet. Studien inkluderte også

sporgassmålinger og målinger med en åpningsplate sammen med ventilasjonsanlegget. Sporgassmetoden ble funnet å være relativt enkel å bruke og svært nøyaktig. Usikkerheten ved luftmengdehastighetsmåling ved bruk av sporgass ble estimert til å være 5,4% til 8,8% for de behandlede tilfellene. Det ble antatt en usikkerhet på 5% i internlekkasje. Studien konkluderer med at lufttetthetsmålinger gjennomført ved bruk av ventilasjonsaggregat er en tilfredsstillende og nøyaktig metode for å beregne bygningens lekkasjetall.

I 2008 utførte Jeong m. fl. en studie hvor de fokuserte på lufttetthet i en yrkesbygning på tre etasjer (4088 m²) og en skole på fem etasjer (8547 m²) [11]. Bygningene som benyttes i studien har vanskelige måleforhold. Det er derfor fokusert på hva som kan gjøres for å sikre gode målinger. Ved økende vindhastighet bør antall trykkmålepunkt økes for å sikre god nøyaktighet. I denne studien ble det i tillegg sett på hvordan heissjakten påvirker hele bygningens luftlekkasjehastighet. For begge byggene viste testen et bedre referansetrykk (nullstrømning) når heissjakten var forseglet. Det er i tillegg konkludert med at dersom bygningstrykket ikke er høyt nok vil en få infiltrasjon av uteluft i heissjakten. I dette studiet har ikke ventilasjonsanlegget klart å oppnå det anbefalte trykket på 60 Pa iht. ASTM E779 [16] og CAN/CGSB 149.15 [17].

Et studie fra 2013 [12] har sammenlignet lufttetthetsmåling med ventilasjonsaggregat og en kombinasjon av blower door og ventilasjonsaggregat. Testbygget var en 5-etasjes kontorbygning på 616 400 m². Studien viste at ventilasjonsaggregatet ikke klarte å generere en tilstrekkelig trykkdifferanse mellom inne og ute, men ved å benytte kraftlikningen (2.6) var det likevel mulig å oppnå en pålitelig luftlekkasje gjennom klimaskjermen ved både lavt (for eksempel 4 Pa) og høyt trykk (for eksempel 50 Pa). Ved å kombinere ventilasjonsaggregat og blower door for å trykksette bygget viser studiet at det er mulig å skape et bygningstrykk tilnærmet lik optimalt trykk. En slik kombinasjon vil også være hensiktsmessig i høye bygg for å minimere usikkerhetene ved målingene på grunn av harde utendørsforhold.

Lee m. fl. utførte i 2017 et studie hvor hensikten var å finne en ny måte å måle bygningstrykket, ΔP , på [13]. Det ble utført lufttetthetsmålinger i to bygg for å undersøke feil ved måling av ΔP . Studien benyttet metodene i standardene [17] [36] for å måle ΔP og sammenlignet med en foreslått metode for å måle ΔP . Byggene som ble benyttet var kontorbygg på hhv. fem og 12 etasjer. I dette studiet ble det benyttet blower door i en bygning og en kombinasjon av ventilasjonsanlegg og blower door i det andre. En kombinasjon ble benyttet ut fra beregninger om at ventilasjonsaggregatene alene ikke var nok for trykksette hele bygget. Det var her gjort beregninger ved et lekkasjetall på 0,4 h⁻¹.

2.4 Usikkerhet

Ved lufttetthetsmålinger i bygg finnes det flere kilder som medfører usikkerhet. Kildene kan være direkte knyttet opp mot bygget, måleapparat eller ytre påkjenninger [40], som for eksempel:

- Forberedelser av testbygget. Her er det viktig med oversikt over hvilke åpninger som skal være stengt, forseglet eller åpen. I tillegg kan forsegling eller lukking av åpninger medføre kunstig økning eller reduksjon av bygningens lufttetthetsnivå.
- Beregning av referanseverdier, som for eksempel areal for gulv og klimaskjerm og bygningens innvendige volum. Det er uenigheter om hva som regnes som byggets innvendige volum. Det kan måles fra dekkekant til dekkekant eller fra dekkekant til himling.
- Inndeling av testsoner. I mange tilfeller er det ikke mulig å måle hele bygget og testen utføres kun i deler av bygget som antas å være representativ for hele bygget.
- Utstyr og programvare. Måleutstyrets nøyaktighet er viktig for å kunne sammenligne testresultater. Det er knyttet større usikkerhet til måleutstyr ved lave luftmengder enn ved høye luftmengder. I tillegg kan det oppstå avvik dersom programvarer håndterer data feil, for eksempel ved beregning av lufttetthet.
- Ytre påkjenninger som vind og temperatur kan utgjøre en stor feilkilde. De fleste standarder setter begrensninger for maks vindhastighet og temperaturdifferanse mellom inne og ute, men avvik kan likevel oppstå, spesielt ved lavt referansetrykk. Ved økende vindstyrke kan et høyt trykkmålingspunkt minke usikkerheten.

Målinger med stor usikkerhet kan likevel anses som akseptable dersom det er mulig å fastslå hvor stor usikkerheten er og om den er innenfor kravet [5]. Eksempel hentet fra Byggforskserien [5] viser hvordan en kan beregne samlet usikkerhet, se Tabell 6. I eksempelet er det antatt lav temperatur og kun måling ved undertrykk opp til 25 Pa.

Tabell 6. Eksempel på beregning av måleusikkerhet [5].

Eksempel	Usikkerhet	Merknad
Samlet usikkerhet ved måling under gode forhold i henhold til gjeldende standard	+/- 15%	Omfatter bl.a. usikkerhet i trykk- og luftmengdemålinger og volumberegning. Mindre usikkerhet kan brukes hvis utførende kan dokumentere at utstyr og rutiner tilsier det
Tilleggsusikkerhet hvor det ikke kan oppnås høyere trykk enn 50 Pa	+/- 5%	Vanligvis gir måling med lavere trykk høyere n_{50}
Tilleggsusikkerhet ved måling kun med undertrykk	+/- 10%	Vanligvis gir undertrykksmåling lavere n_{50}
Tilleggsusikkerhet ved måling i vind		Ingen vind ved måletidspunkt
Tilleggsusikkerhet ved måling i kulde	+/- 15%	15 °C temperaturforskjell mellom inne og ute. Opptil 12 Pa trykkforskjell på grunn av oppdrift
Tilleggsusikkerhet ved måling ved kun en trykkforskjell		Ikke aktuelt
Samlet usikkerhet	+/- 24%	$\sqrt{\sum (Usikkerhetsfaktorer)^2}$

2.5 Standarder

Som nevnt tidligere finnes det flere standarder som beskriver lufttetthetsmålinger. Disse beskriver ideelle forhold og stiller krav til blant annet vindhastighet, temperaturdifferanse over fasaden og antall trykkmålepunkt. Tabell 8 er videreutviklet fra tabell i tidligere studier [13] og viser en sammenligning av de forskjellige standardene. En av de største forskjellene mellom standardene er

bruk av trykksettingsutstyr. To av standardene krever kun at enheten er i stand til å skape ønsket over- og undertrykk, mens en standard presiserer at byggets ventilasjonsanlegg skal benyttes.

2.5.1 NS-EN ISO 9972

Ved lufttetthetsmåling i Norge er det den internasjonale standarden, NS-EN ISO 9972, [36] som gjelder. For å kunne utføre en lufttetthetsmåling krever standarden at trykksettingsutstyret som benyttes skal være i stand til å inducere over- og undertrykk innenfor en gitt rekkevidde på 10-100 Pa, hvor høyeste trykkdifferanse skal være minst 50 Pa. Testen er fortsatt gyldig dersom høyeste trykk er 25 Pa, men dette skal dokumenteres nøye. Det anbefalte utstyret er enten en kombinasjon av en vifte, en kanal og en luftmåler som kobles til bygningen, en automatiser vifte (for eksempel en blower door) eller å benytte bygningens VVS-viftesystem. Hva som inngår i byggets VVS-viftesystem er ikke spesifisert. Utstyret skal i tillegg sørge for konstant luftstrøm ved hvert målepunkt.

Trykkdifferansen over fasaden måles ved klimaskjermens laveste etasje, men ved høye bygninger er det anbefalt å måle trykkdifferanse ved øverste etasje i tillegg. Ved måling av referansetrykk skal dette skje både før og etter trykktestingen. Referansetrykket skal være innenfor en grense på ± 5 Pa. Det vil si at absoluttverdien av Δp_{01+} , Δp_{01-} , Δp_{02+} eller Δp_{02-} ikke skal være høyere enn 5 Pa. Her representerer Δp_{01+} gjennomsnittet av de positive verdiene for referansetrykkettrykket, mens Δp_{01-} representerer gjennomsnittet av de negative verdiene. Siden referansetrykket måles både før og etter trykktestingen benyttes Δp_{01} og Δp_{02} . Dersom trykket overskrider 5 Pa skal testen erklæres ugyldig. Ved trykktesting av bygget skal testen utføres ved å ta målinger av luftens hastighet og trykkdifferanse over fasaden ved en rekke påførte trykkforskjeller. Det skal ikke være mer enn 10 Pa forskjell mellom hvert trinn. Målingene skal skje ved minst fem datapunkt, hvor laveste punkt er den største verdien av 10 Pa eller fem ganger referansetrykket (Δp_{01}).

Dersom produktet av temperaturdifferansen over fasaden, angitt i Kelvin, multiplisert med byggets høyde, i meter, gir et resultat som er større enn 250 mK vil det være lite sannsynlig at en klarer å oppnå nullstrømning. Høyden som benyttes skal være testsonens høyde. Dersom vindstyrken blir for kraftig vil også dette medføre vanskeligheter ved å oppnå ønsket referansetrykk. Ved vindhastighet over 3 m/s ved bakkenivå, meteorologisk vindhastighet over 6 m/s eller vind som når 3 på Beauforts skala vil det være lite sannsynlig at referansetrykket tilfredsstilles.

Ved måling av trykkdifferanse skal det benyttes et instrument som kan måle trykkdifferanse med en nøyaktighet på ± 1 Pa innenfor en rekkevidde på 0-100 Pa. For å måle luftstrøm kreves en

nøyaktighet på $\pm 7\%$. Måling av temperaturdifferanse skal utføres med et instrument med nøyaktighet på $\pm 0,5$ K. Generell usikkerhet ved målingene er i de fleste tilfeller lavere enn 10% ved rolig vind, men ved vindfulle forhold kan den nå $\pm 20\%$.

2.5.2 ASTM International, E779 – 10

Lufttetthetsmålinger i USA skal utføres i samsvar med ASTM E779 [16]. I likhet med NS-EN ISO 9972 stilles det ikke spesifikke krav til hvilke enheter som benyttes ved trykksetting av en bygning. Enhver enhet som er i stand til å skape nødvendig over- og undertrykk kan benyttes, for eksempel vifte, blower door eller bygningens VVS-system. Utstyret skal i tillegg sørge for konstant luftstrøm ved hvert datapunkt.

Ved trykksetting av bygget skal trykksensorene plasseres ved bunn av leveggen. Ved mye vind benyttes et gjennomsnitt av målinger ved flere lokasjoner, for eksempel ved hver fasade. Det er viktig å unngå utadgående hjørner og helst plassere sensorene ved midten av veggen. Unngå direkte sollys. Indusert trykk skal variere fra 10 – 60 Pa, avhengig av utstyrets kapasitet. For å oppnå hele spekteret benyttes trinn på 5 eller 10 Pa. I noen tilfeller vil det ikke være mulig å oppnå hele det øvre spekteret, men ved slike tilfeller erstattes et lite utvalg som omfatter minst fem målepunkt.

Ved opprettelse av en testsone skal sonen utformes slik at det opprettholdes et referansetrykk på $\pm 10\%$ av den målte trykkdifferansen over fasaden. Trykkdifferansen skal måles ved høyeste og laveste gulvnivå og på lo- og lesiden av bygget. Dersom produktet av temperaturdifferansen over fasaden ($^{\circ}\text{C}$) multiplisert med byggets høyde (meter) gir et resultat som er større enn 200 m°C vil trykkdifferansen som oppstår på grunn av skorsteinseffekten bli for stor for å oppnå nøyaktige resultater. Testen skal derfor ikke utføres. Standarden nevner ingenting om vind- og temperaturforhold. Dette er kun nevnt i eldre versjon av standarden.

Trykkdifferansen måles ved å benytte et manometer eller en trykkindikator som kan måle med en nøyaktighet på $\pm 5\%$ av målt trykk eller 0,25 Pa. Her benyttes den største verdien. Måling av luftstrøm krever et instrument som kan måle en nøyaktighet på $\pm 5\%$ av den målte luftstrømmen. Temperaturen skal måles med et instrument som kan angi en nøyaktighet på ± 1 $^{\circ}\text{C}$.

2.5.3 CAN/CGSB-149.15 – 96

I motsetning til standardene nevnt over er det kun den canadiske standarden som presiserer at byggets ventilasjonsanlegg skal benyttes ved trykksetting. Systemet må ha kapasitet til å indusere en trykkdifferanse på ca. 60 Pa.

Måling av trykket skal skje ca. 1 meter over bakken på le-siden av bygget og nær midten av taket. Lengden på slangen som brukes skal være like lang ved begge målingene. Ved trykksetting skal ventilasjonsanlegget produsere en trykkdifferanse mellom 0 – 75 Pa. I motsetning til de andre standardene kreves det her at luftmengden skal beregnes ved 10, 50 og 75 Pa. I endringsvedlegget [41] står det at dersom en bygning ikke klarer å oppnå et trykk på 60 Pa er kravet minimum 30 Pa for å oppnå rimelige resultater. Referansetrykket måles på midten av en etasje som ligger nær midten av bygget.

Dersom vindhastigheten er større enn 20 km/h (5,56 m/s) og temperaturen er mindre enn angitt i Tabell 7 bør ikke testen utføres.

Tabell 7. Utendørs lufttemperatur i forhold til byggets antall etasjer.

Bygningshøyde, etasjer	Utendørs lufttemperatur, °C
≤ 10	5
11 - 20	8
21 - 30	10
≥ 31	15

Trykkmålestyret, for eksempel et mikromanometer, skal ha en nøyaktighet på ± 1 Pa og kunne måle en trykkdifferanse over fasaden fra 0 – 75 Pa. For å måle lufthastighet kan det benyttes et målekors og en statisk trykksonde. Målingene skal utføres med en nøyaktighet på 5% av målt strømningshastighet. Ved måling av temperaturdifferanse brukes et termometer med rekkevidde fra -10 til 35 °C og en nøyaktighet på ± 1 °C.

Tabell 8. Sammenlikning av typiske standarder for lufttethetsmålinger

		ISO 9972:2015 Internasjonal	ASTM E779-10, (2010), USA	CAN/CGSB-149.15-96 (1996) Canada	
Q	Bygningsstørrelse	-	-	Relativt store bygninger	
	Innvendig volum	Netto gulvareal x gjennomsnittlig netto takhøyde.	Netto gulvareal x gjennomsnittlig netto takhøyde	Proseduren kan brukes på kontorbygninger (lave og høye bygninger), store varehus, industrianlegg og i enkelte tilfeller flerbruksbygninger. Inkluder totalt volum av alle rom som er trykksatt under testen (alternativ)	
	Bygningskroppens areal	Totalt areal av gulv, vegger og tak som grenser til innvendig volum	-	Område av yttervegger over laveste etasje, det øverste taket, de laveste testetasjene (innvendige dimensjoner) (alternativ)	
	Målenøyaktighet			Ytterveggmålinger skal være $\pm 1\%$	
	Trykksettingsutstyr	Enhver enhet som er i stand til å skape overtrykk og undertrykk, for eksempel vifte og kanal (Vedlegg A.2), Blower door (Vedlegg A.3), HVAC (Vedlegg A.4)	Enhver enhet som er i stand til å skape over- og undertrykk, for eksempel Blower door montering, vifte, HVAC	AHU	
		HVAC (Vedlegg A.4) - stiller ikke krav til utstyret til trykksetting, bortsett for at viftene bør kunne reguleres og man bør kunne veksle mellom bare tilluftsvifte og bare avtrekksvifte	HVAC - stiller ikke krav til utstyret til trykksetting.		
			Ved bruk av spjeld til styring av luftstrøm, skal spjeld være fullstendig lukket for nullstrømningsmålinger	Ved bruk av spjeld til styring av luftstrøm, skal spjeld være fullstendig lukket	
	Trykkmåleutstyr	Instrument som kan måle angitt nøyaktighet	Manometer eller trykkindikator	For eksempel micro- manometer	
	Målenøyaktighet	± 1 Pa innen 0-100 Pa	Det største av $\pm 5\%$ av målt trykk eller 0,25 Pa.	± 1 Pa eller bedre	
	Luftmengdemåleutstyr	Uspesifisert. Eneste kriterium er at det må oppfylle krav til nøyaktighet gitt under, men sporgasmåling er nevnt som en mulighet.	Uspesifisert	Utstyret skal være enkelt å installere og fjerne fra eksisterende luftkanaler. For eksempel et apparat bestående av et totalgjennomsnitts trykkrør og et statisk trykkrør.	
		Målenøyaktighet	$\pm 7\%$ av avlesningene	$\pm 5\%$ av målt luftstrøm	$\pm 5\%$ eller bedre
	Luftlekkasje	Målenøyaktighet	< 10% Vindfulle omgivelse: $\pm 20\%$		$\pm 10\%$
	Temperaturmåler	Instrument som kan måle temperatur		Termometer som måler fra -10 til 35°C	
	Målenøyaktighet	$\pm 0,5$ K			$\pm 1^\circ\text{C}$

ΔP	Nullstrømtrykkforskjell (ΔP0)	ΔP0: gjennomsnitt av før og etter testen	ΔP0: gjennomsnitt av før og etter testen	ΔP0: gjennomsnitt av før og etter testen
	Målenøyaktighet	ΔP0 ≤ ± 5 Pa	± 10% av målt trykkdifferanse	-
		Dersom absoluttverdien av Δp01+, Δp01-, Δp02+ eller Δp02- er høyere enn 5 Pa, skal testen erklæres ugyldig	Trykkdifferansen måles ved høyeste og laveste gulvnivå og på lo- og leside av bygget. Trykkdifferansen skal være ved høyeste trykk.	Trykkdifferansen måles på midten av en etasje som ligger nær midten av bygget.
Meteorologiske forhold	Skorsteinseffekt drivkraft (m x °C)	Produktet av bygningshøyden (m) og inne/ uteluftstemperaturforskjell (K) ≤ 250 m*K	Produktet av bygningshøyden (m) og inne/ uteluftstemperaturforskjell (°C) ≤ 200 m*°C	-
	Vind	Vindhastighet (nær bakken) ≤ 3 m/s ELLER meteorologisk vindhastighet ≤ 6 m/s ELLER Beauforts skala < 3	-	Opp til 3 etasjer: 25 km/h 4 til 10 etasjer: 20 km/h 11 til 20 etasjer: 20 km/h 21 til 30 etasjer: 15 km/h 31 og høyere: 15 km/h
	Temperatur	-	-	10 etasjes bygning: ≤ 5°C (ute) 10-20 etasjes bygning: ≤ 8°C (ute) 21-30 etasjes bygning: ≤ 10°C (ute) 31 etasjes bygning: ≤ 15°C (ute) Opp til 3 etasjer: 20°C
	Temperaturdifferanse mellom inne og ute	-	-	4 til 10 etasjer: 15°C 11 til 20 etasjer: 13°C 21 til 30 etasjer: 10°C 31 og høyere: 8°C
Trykkmålingssted		Ute: laveste gulvnivå	Ute: laveste gulvnivå (gjennomsnitt av fire forskjellige steder anbefales)	Ute: gjennomsnitt av det høyeste og laveste gulvnivå
			Skal måles på lo- og leside	Skal måle ca. 1 m over bakkenivå på lesiden og nær midten av taket.
		Inne: laveste gulvnivå	Inne: laveste gulvnivå	Inne: midt på gulvet nær midten av høyden
		Ved høye bygninger måles trykkdifferansen ved øverste etasje i tillegg	Ved høye bygninger måles trykkdifferansen ved øverste etasje i tillegg	
Retninger		Overtrykk ELLER undertrykk	Overtrykk OG undertrykk	Overtrykk ELLER undertrykk
		Det er anbefalt å utføre både over- og undertrykk, og midle resultatet		

Område	Minimum	Den største av 10 Pa ELLER fem ganger ΔP_{01}	10 Pa	0 Pa
	Maksimum	50 Pa - 100 Pa 25 - 50 Pa* *Må dokumenteres godt i rapporten hvis trykkdifferanse på 50 Pa ikke oppnås	60 Pa	Ikke større enn 75 Pa Ideelt 0 til 60 Pa For en bygning som ikke kan oppnå 60 Pa er kravet minimum 30 Pa for å oppnå rimelige resultater
Verdi	Tilvekst	Ikke større enn 10 Pa	5 Pa - 10 Pa	-
	Antall målepunkt	Minst 5 (likt fordelte datapunkter)	Minst 5 (likt fordelte datapunkter)	Minst 4
Finne lekkasjeområder		Subtraksjonsmetoden Termografering Røyk Lufthastighetsmålestyr		
Luftlekkasjeksponent, n		0,5 < n < 1,0	0,5 < n < 1,0	0,5 < n < 1,0
Konfidensintervall			Overtrykk: halve bredden av 95% Undertrykk: halve bredden av 95%	
Luftens densitet	Beregning av densitet	Kan beregnes ut fra formel gitt i vedlegg B		
	Målenøyaktighet	$\pm 5\%$ (for instrumenter som kan måle relativ fuktighet)		
	Korrigerings av luftmengder	For korrigerings av luftstrømningshastighet for luftdensitet, les av inne- og utetemperatur i bygninger før, under og etter testing. Ligninger gitt på side 12 for å korrigere lekkasjetall til STP.		De målte luftstrømningshastigheter må korrigeres for forskjellene i lufttetthet mellom 1. måle- og kalibreringsforholdene, og 2. måleforholdet og inneluften som lekker ut gjennom klimaskjermen. Beregninger finnes i vedlegg D.
	STP (Standard Temperature and Pressure) som benyttes til å beregne referanse densitet	20°C, 101300 Pa, og 0% RF (side 12)		Ved 20°C og 101,325 Pa er densiteten 1,204 097 kg/m ³

3. Metoder

3.1 Testbygningen, WANG Ung

WANG Ung er en helt ny ungdomsskole for idrett på Hasle i Oslo, som skal være klar til overlevering 29. juni 2018, se Figur 10. Bygget består av fire fulle etasje, inkludert kjeller, og en arealreduert toppetasje. Skolens areal er på 3000 m² og har et volum på 9300 m³, som rommer blant annet aktivitetssoner, læringsrom, kontorer og kafé-/spiseområder, se vedlegg 8.1. Bygget forsynes med luft fra to kompaktaggregat, DVCompact 15 og DVCompact 150, fra Systemair. DVCompact finnes i 11 størrelser og sikrer dermed optimal dimensjonering opp til 42 000 m³/h [42].

Byggherren er Hasle Linje 5 AS, som eies 50%/50% av Høegh Eiendom AS og AF Gruppen Norge AS. Som byggherre stiller HasleLinje høye miljøkrav, som medfører at bygget skal miljøklassifiseres i henhold til BREEAM-NOR VERY GOOD [43]. Ved dette prosjektet er det AF Gruppen, AF Nybygg, som har totalentreprise.

AF Gruppen har tidligere gjort innledende lufttetthetsmålinger med blower door hvor det ble oppnådd et lekkasjetall på 0,5 h⁻¹. På dette tidspunktet var det ikke montert ytterdører i bygget, slik at døråpningene ble tettet med plast. Etter at klimaskjermen var tett ble det utført en ny lufttetthetsmåling med blower door som resulterte i et lekkasjetall på ca. 0,42 h⁻¹.



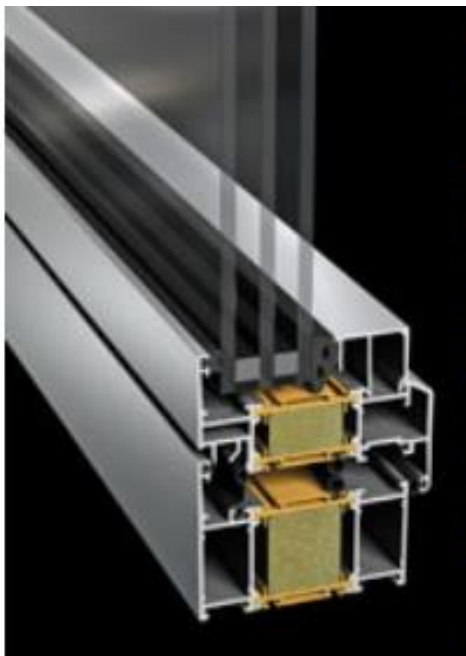
Figur 10. Inngang på WANG Ung. Fasade mot sørøst.

Bygningselementenes permeabilitet

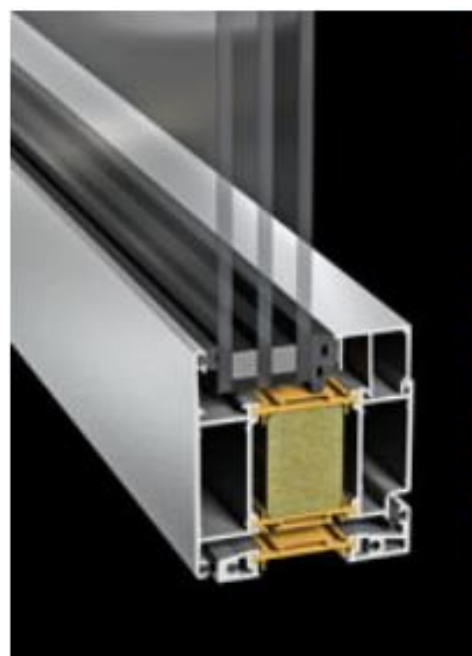
I kjelleren er det lagt 300mm betongdekker med 250mm prefabrikerte vegger. Utvendig er det 5mm helklebet membran og 120mm EPS isolasjon. Ytterveggene består av utvendig panel av typen termofuru med krysslekting, vindsperre av typen Tyvek FireCurb, bindingsverk 36x198 med 200mm Glava 34, 0,20mm polyetylenfolie, krysslekting med 50mm Glava isolasjon og 12,5mm gips. Innvendige vegger er bygget opp av stålstendere med flere lag gips etter behov.

I henhold til rapport fra Byggforsk [9] bør luftgjennomgangstallet for bygningselementer være lavere enn $0,010 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{hPa}$ for å kunne oppnå et lekkasjetall lavere enn $0,6 \text{ h}^{-1}$ ved en trykkdifferanse på 50 Pa. Siden vindsperren alene ikke alltid klarer å oppnå kravet om lavt nok luftgjennomgangstall er det viktig med mer en ett tettesjikt. Vindsperren har et luftgjennomgangstall på $\leq 0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}50\text{Pa}$, mens dampsperran har en permeabilitet på $2,25 \cdot 10^{-15} \text{ kg/msPa}$. Beregninger i rapporten forutsetter at vinduer og dører ikke har et luftgjennomgangstall som overskrider $1,9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ved 50 Pa trykkforskjell.

Både vinduer og dører er levert av NorDan. Vinduene er av typen Sapa Vindu 1086 – innadslående høyisolert, se Figur 11, mens dørene er av typen Sapa Dør 2086 – høyisolert, se Figur 12. Tilhørende egenskaper for både vindu og dør er vist i Tabell 9.



Figur 11. Sapa Vindu 1086 – innadslående høyisolert [44].



Figur 12. Sapa Dør 2086 – høyisolert [44].

Tabell 9. Egenskaper for Sapa vindu og dør [44].

Egenskaper	Vindu	Dør	
U-verdi glass, U_g	0,6	0,5	W/m ² K
U-verdi vindu/dør, U_w	0,77	0,95	W/m ² K
Lystransmisjon, LT	69	69	%
g-verdi, g	50	50	%
Lydisolering, R_w	41	39	dB
Regntetthet	Klasse 9A	Trinnvis utførelse, klasse 2 (Plus), klasse 4 (Extreme)	NS-EN 12208
Lufttetthet	Klasse 4	Trinnvis utførelse, klasse 2 (Plus), klasse 4 (Extreme)	NS-EN 12207

Som Tabell 9 viser har vinduene og dørene permeabilitet (lufttetthet) etter klasse 2 og 4 i NS-EN 12207 [45]. Tabell 10 viser en oversikt over hvilke krav som stilles i de forskjellige klassene. Vinduer og dører testes etter NS-EN 1026 [46] og klassifiseres etter NS-EN 12207. Det er mye som har skjedd med varmeisoleringsvevnen til vinduer over de 10 siste årene. For 10 år siden var lufttetthetsklassen til et tilsvarende vindu, Sapa Vindu 1074, også klasse 4, men i henhold til en eldre standard, NS-EN 12207:1999 [47], se vedlegg 8.12.

Tabell 10. Tetthetsklasser for vinduer og dører etter NS-EN 12207:2016 [45].

Klasse	Største trykkdifferanse, P_{max} [Pa]	Luftstrøm per areal ved 100 Pa trykkdifferanse	Luftstrøm per fugelengde ved 100 Pa trykkdifferanse
	Pa	$m^3 / m^2 b$	$m^3 / m^2 b$
1	150	50	12,5
2	300	27	6,75
3	600	9	2,25
4	600	3	0,75

Tabell 11. Tetthetsklasser for vinduer og dører etter NS-EN 12207:2000 [47]

Klasse	Største trykkdifferanse, P_{max} [Pa] <i>Pa</i>	Luftstrøm per areal ved 100 Pa trykkdifferanse <i>m³ / m²h</i>	Luftstrøm per fugelengde ved 100 Pa trykkdifferanse <i>m³ / m²h</i>
0	Ikke prøvd	Ikke prøvd	Ikke prøvd
1	150	50	12,5
2	300	27	6,75
3	600	9	2,25
4	600	3	0,75

3.2 Måleutstyr og måleområde

Når lufttetthetsmålingen utføres kreves det minst to trykkmålere. Den ene trykkmåleren benyttes for å måle trykkdifferansen over fasaden, mens den andre benyttes for å måle trykkfall og luftmengde i ventilasjonsaggregatet. Enten ved roterende varmegjenvinner eller ved dyseinnløp. Det er her benyttet et termisk anemometer, *Swema 3000*, se Figur 13, for å måle trykk og luftmengde i ventilasjonsaggregatet og et micromanometer, *DPM TT570SM*, se Figur 14, for å måle trykkdifferanse over fasaden. *Swema 3000* kan i tillegg benyttes for å måle temperatur inne og ute. Generelle spesifikasjoner for trykkmålerne er gitt i Tabell 12-13.

Tabell 12. Generelle spesifikasjoner for *Swema 3000*.

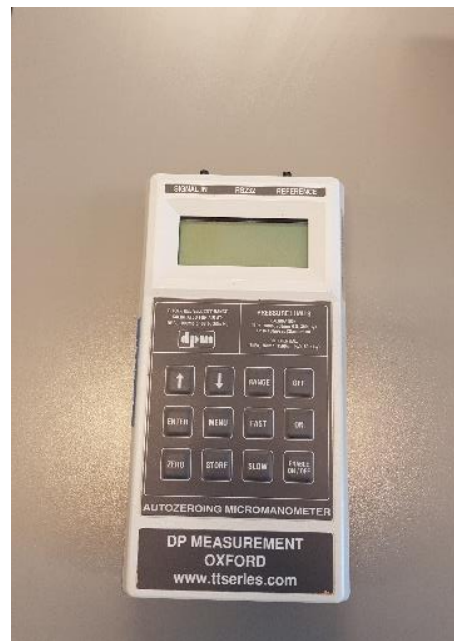
Swema 3000	
Målerrekkevidde	-300... 1500 Pa
Usikkerhet ved 20°C	± 0,3% av lest verdi, laveste ± 0,3 Pa
Maks belastning	± 50 000 Pa
Temperaturavhengig	0,2 Pa/°C
Temperaturrekkevidde	0... 50°C

Tabell 13. Generelle spesifikasjoner for DPM TT570SM.

DPM TT570SM	
Målerrekkevidde	$\pm 0 \dots 999$ Pa
Anbefalt temperaturrekkevidde	$0 \dots 50^{\circ}\text{C}$
Rekkevidde for lagring av temperaturdata	$-5 \dots 50^{\circ}\text{C}$
Spenn-stabilitet vs. temperatur	0,1% av området i bruk/ $^{\circ}\text{C}$
Nullsystemnøyaktighet	$\pm 0,05$ Pa
Antall datalogginger	$0 \dots 2500$ enheter
Systemets luftlekkasje	0,1 ml/minutt
Oppøsning	0,1 Pa



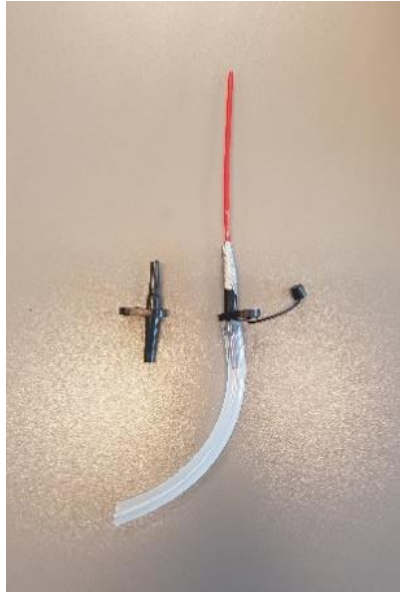
Figur 13. Svema 3000.



Figur 14. DPM TT570SM.

I tillegg til trykkmålerne trengs det plastslanger og kapillærrør som kobles til trykkmålerne. Det er viktig at kapillærrøret ikke klemmes flatt når det plasseres i en døråpning. Ved denne målingen ble det benyttet et «WD-40» plastrør. For måling av trykkfall over rotor eller trykk over dyse trengs det to plastrør og to plastslanger og for måling av trykkdifferanse over fasaden trengs det to plastslanger og ett plastrør. Det er viktig at plastrørene er rette og ikke har knekk eller «bulk» og at overgangen

mellom plastslange og plastrør er tett. For å sikre en tett kobling mellom slange og rør bør det benyttes en overgang som tettes med teip, se Figur 15.

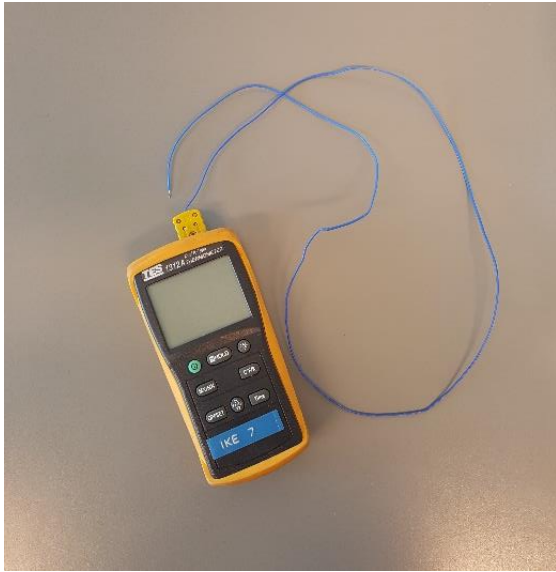


Figur 15. Kobling mellom plastrør og plastslange.

I tillegg til en Swema 3000 er det lurt å ta med en egen temperaturmåler. Det er benyttet et termometer med termoelement type K, *TES 1312A Thermometer*, med ledning, se Figur 16. For å forsegle uønskede utettheter i klimaskjermen er det benyttet tetningsteip, se Figur 17. Generelle spesifikasjoner for termometeret er vist i Tabell 14.

Tabell 14. Generelle spesifikasjoner for TES 1312A Thermometer

TES 1312A Thermometer		
Temperaturrekkevidde		-50...1350°C
Nøyaktighet	-50...1000°C	± 0,3% av avlest verdi + 1°C
	1000...1300°C	± 0,5% av avlest verdi + 1°C
Oppløsning	≤ 199,9°C	0,1°C
	> 200°C	1,0°C

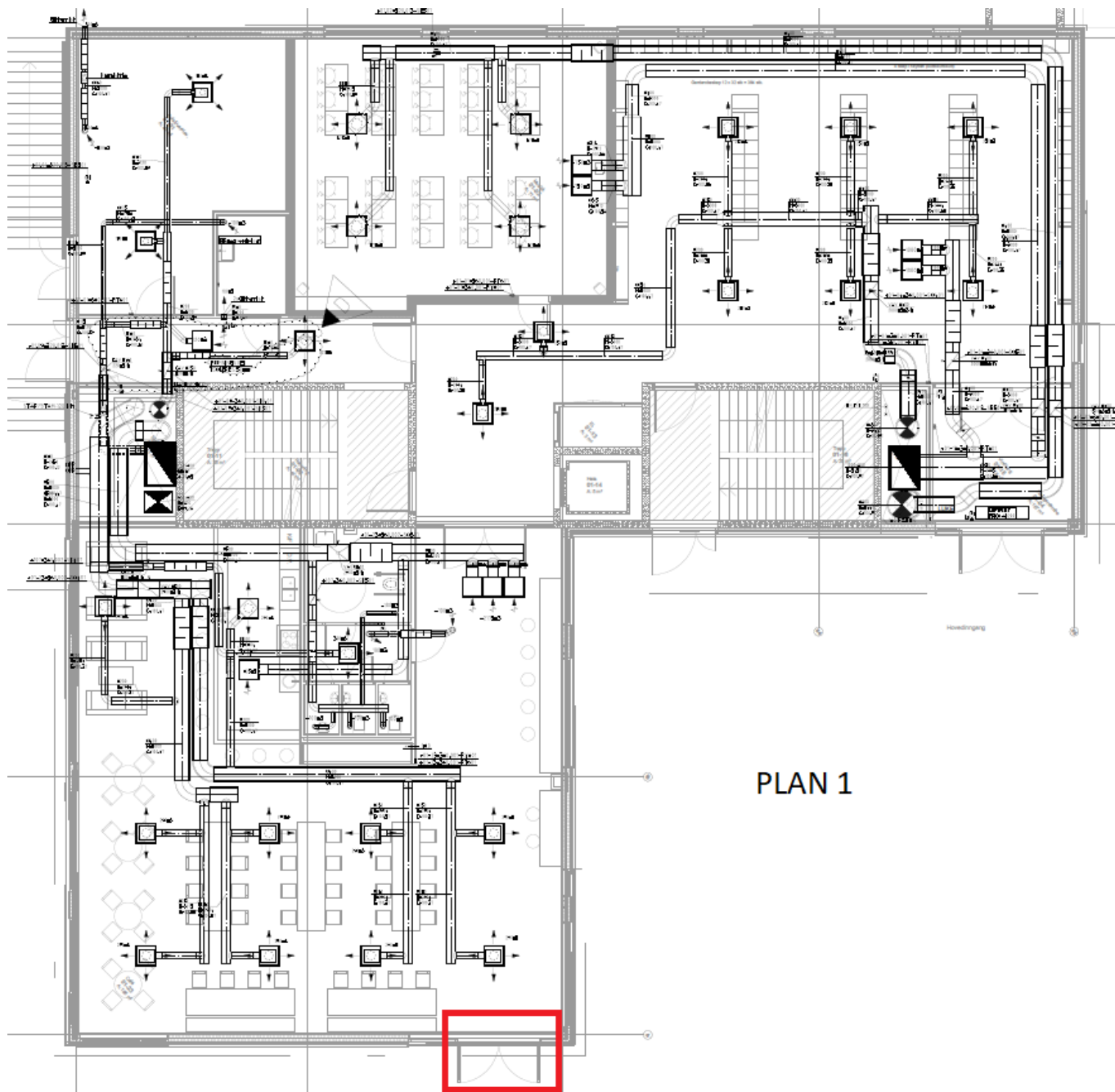


Figur 16. TES 1312A Thermometer.

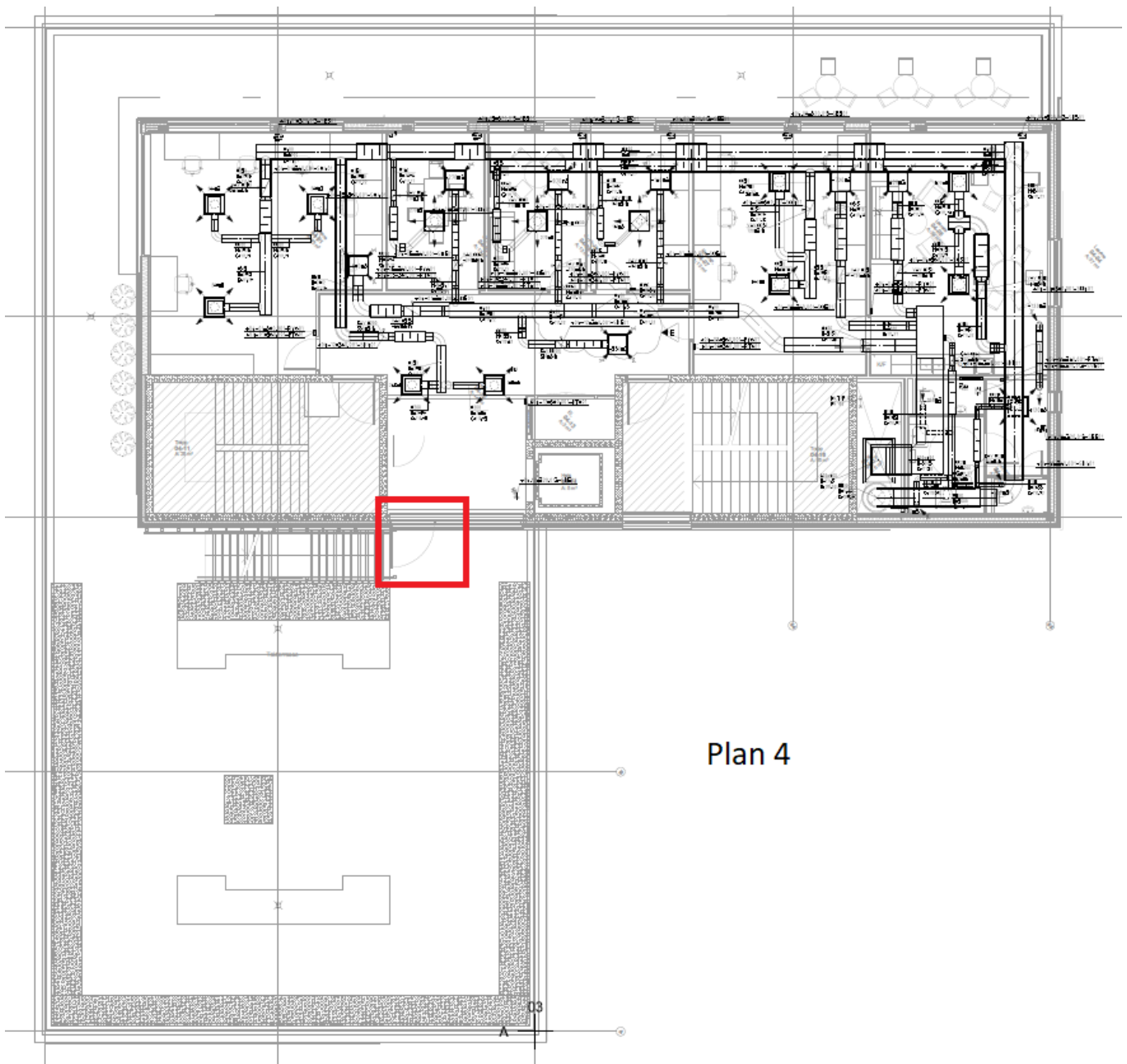


Figur 17. Tetningsteip.

Før målingene skrives det ut en viftekurve slik at aggregatets viftekapasitet kan vurderes. Ved å gjøre dette vil det være lettere å finne det maksimale og minste trykket som kan benyttes. Områdene hvor referansetrykk og trykkdifferanse er målt er vist med rød sirkel på plantegningene. Begge dørene vender mot sørøst. Figur 18 viser plan 1 og Figur 19 viser plan 4.



Figur 18. Oversikt over måleområde i plan 1.



Figur 19. Oversikt over måleområde i plan 4.

3.3 Forberedelser før testdagen

Det ble utført en befarings på byggeplassen 22.03.18 med anleggsleder, Tore Brekken Riise, og teknisk rådgiver i bygningsfysikk, Tom Farstad, fra AF Gruppen. På befaringsen ble det gitt en oversikt over byggets størrelse og utforming og gjennomgang av tekniske plantegninger. Som tidligere nevnt er det to aggregat som forsyner bygget med luft, hvor det minste skal levere 3500 m³/h, mens det største skal levere 32 000 m³/h ved 80% samtidighet. Disse verdiene er i henhold til systemskisse i vedlegg 7.1. Begge aggregatene er plassert i teknisk rom i kjeller. Det minste aggregatet forsyner kun kantineområdet med luft, mens det store aggregatet forsyner resterende del av bygget. Etter befaringsen ble det gjort en vurdering på om det var mulig å kun benytte det minste aggregatet til å utføre lufttetthetsmålingen. Beregninger ved et lekkasjetall på 0,4 h⁻¹ viste at det ville være mulig å oppnå en trykkdifferanse på ca. 45 Pa ved en luftmengde på 3466 m³/h, se vedlegg 7.2. Værforholdene ble undersøkt både dagen før lufttetthetsmålingene og samme dag som målingen. Det ble utarbeidet en sjekklister for klargjøring av bygget som ble benyttet ved klargjøring på testdagen, se anvisning i vedlegg 7.15.

3.4 Gjennomføring

3.4.1 Forberedelser

Før målingene starter er det viktig å skape en tett klimaskjerm. Det medfører at alle uønskede åpninger lukkes og forsegles. Skolebygget har ingen åpningsvinduer og det finnes kun ytterdører i U, 1., 4. og 5.(tak) etasje. Alle ytterdører stenges og det henges opp skilt om at dørene skal holdes lukket grunnet trykktesting. Innvendig tettes alle vasker, sluk, toalett og dusjavløp, se Figur 20-21. Det var ikke innlagt vann på testdagen, men noen sluker og toalett var likevel fylt med vann. Disse ble ikke tettet med teip siden vannlåsen var fylt. I underetasjen er det laget et spesialrom for undervisning i naturfag. I dette rommet ble alle spesialavtrekk tettet med teip, se Figur 22. Det ble forsøkt å tette viften til spesialavtrekket, men grunnet dårlig tilgang var det ikke mulig.



Figur 20. Tetting av vask til venstre og tetting av toalett til høyre.

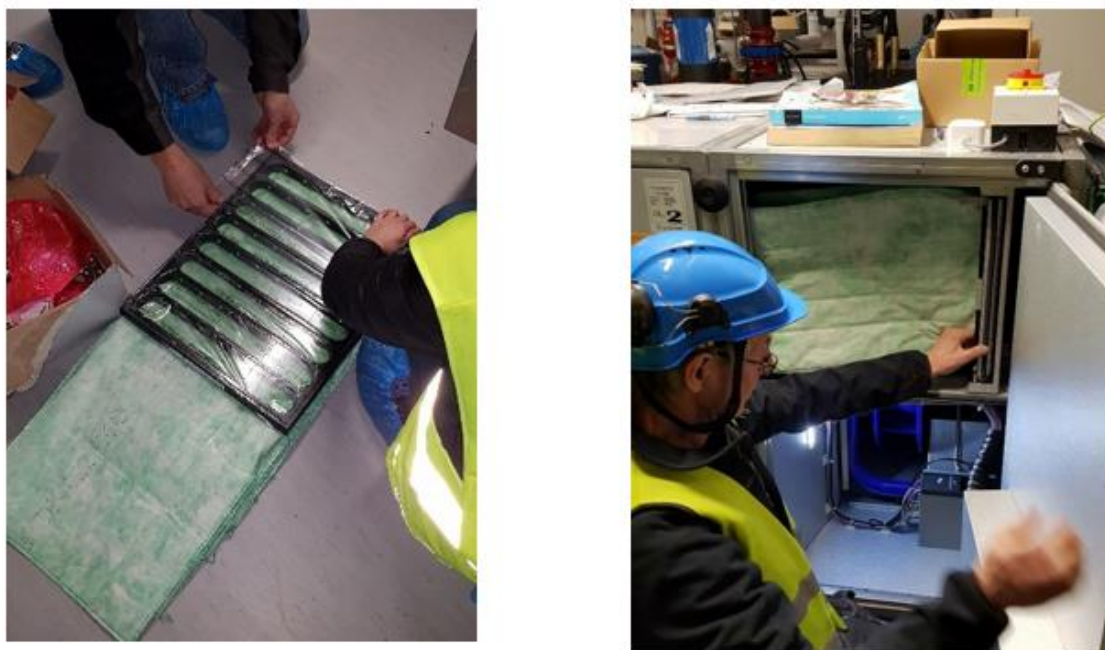


Figur 21. Tetting av rørføringer til venstre og tetting av dusjsluk i garderobe til høyre.



Figur 22. Tetting av spesialantrekk. Punktansug til venstre og avtrekkskap til høyre.

Da det er ønskelig at bygget testes ved normale driftsforhold ble ikke heisen forseglet, men alle heisdørene ble holdt lukket. I teknisk rom er det mange rørføringer gjennom vegg, men siden det ikke er noe garanti for at disse blir tett for bygget tas i bruk ble de heller ikke tett ved målingene. I det minste ventilasjonsaggregatet ble filterkassetten på avtrekkssiden tett med teip, se Figur 23. Ved måling av referansetrykk skal også filter på tilluftssiden tettes, men dette ble ikke gjort, fordi aggregatene er kompaktaggregat med innebygde stengespjeld. Det ble antatt at disse ville være tett nok og de ble derfor ikke tett, men for å unngå usikkerhet burde også filterkassetten på tilluft vært tett. På bakgrunn av tidligere beregninger om det minste aggregatets kapasitet, DVCompact 15, ble det besluttet å kun benytte dette ved trykktestingen, se vedlegg 7.2. Det største aggregatet, DVCompact 150, ble stengt ved å benytte de innebygde stengespjeldene. For at hele bygget skal fungere som én sone holdes alle innvendige dører åpen for å sikre en god luftstrømning mellom rommene.

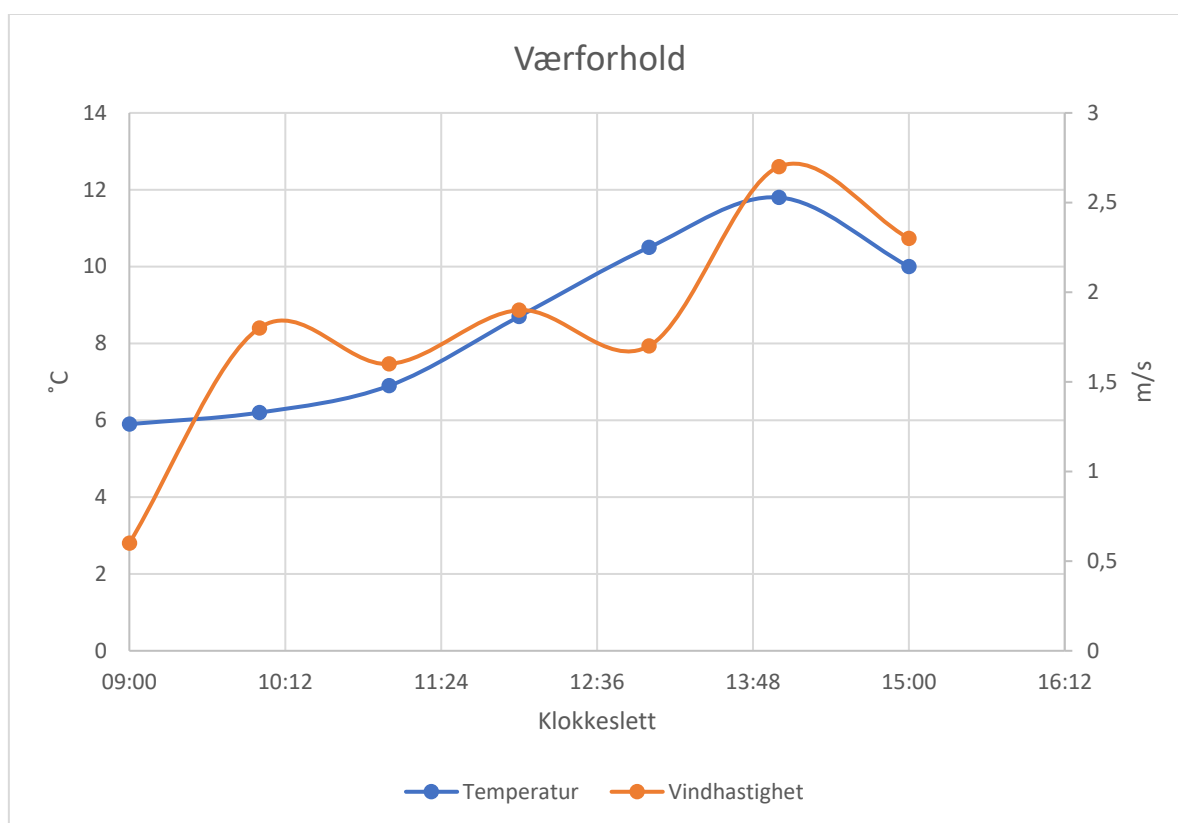


Figur 23. Teiping av filterkassett til venstre og montering av filterkassett i aggregat til høyre..

Værforhold ble notert fra www.yr.no for kl.09-15. Tabell 15 og Figur 24 viser hvordan forholdene endrer seg i løpet av måleperioden. Værdatabene gjelder for målestasjonen på Blindern i Oslo, som ligger 4,0 km fra Hasle.

Tabell 15. Oversikt over værforhold i løpet av måleperiode.

Klokkeslett Kl.	Utetemperatur °C	Vindhastighet m/s	Vindretning	Luftfuktighet %
09:00	5,9	0,6	sørøst	82
10:00	6,2	1,8	sørvest	83
11:00	6,9	1,6	sørvest	76
12:00	8,7	1,9	sør	68
13:00	10,5	1,7	sør-sørvest	56
14:00	11,8	2,7	vest-sørvest	51
15:00	10	2,3	vest-nordvest	55



Figur 24. Værforhold i løpet av måleperiode.

3.4.2 Måling av referansetrykk

Når bygget er klargjort kan måling av referansetrykket starte. Dette utføres ved å måle trykkdifferansen over fasaden og gjøres mens ventilasjonsaggregatet er av og kanalene er stengt. Referansetrykket måles for å finne nullstrømning.

Siden bygget ikke har åpningsvinduer måles referansetrykket i hovedinngangen i 1. etasje og ved dør ut til takterrasse i 4. etasje, som vist i Figur 18-19. Referansetrykket ble målt både før og etter lufttetthetsmålingene startet og forholdene i ventilasjonsaggregatet var de samme ved begge målingene.

Ved måling av referansetrykk ble det brukt en DPM trykkmåler. I første etasje er døren som er installert ferdig montert og trykket må derfor måles gjennom døråpningen. Det ble koblet et WD-40 plastrør og to plastslanger til referansepunktet på trykkmåleren, se Figur 25. Plastrøret er mer robust enn plastslangen og kan derfor teipes fast i døråpningen uten å bli klemt flat. Det er her viktig at plastrøret ikke ligger horisontalt i døråpningen, men får en liten vinkel for å unngå å bli klemt flat, se Figur 26. Plastslangen kobles til plastrøret på utsiden av døren og henges over en pall som står noen meter fra bygget, se Figur 27. Ved det andre punktet på trykkmåleren ble det koblet en plastslange som ble lagt inne på gulvet. I fjerde etasje var ikke døren ferdig montert og manglet dermed nøkkelhull og lås. Dette var forseglet med teip, men ved måling av referansetrykket ble det lagd et lite hull slik at det var mulig å føre plastslangen gjennom hullet, se Figur 28. Ved å gjøre dette unngår en å benytte plastrør.

For å få resultater fra målingen ble «fast»-funksjon og «store»-funksjon på trykkmåleren benyttet. Ved å trykke på fast beregner trykkmåleren et gjennomsnitt av det påførte trykket innenfor et tidsintervall på 0 sek. «Store-knappen» lagrer avlesningene manuelt. Resultatene ble i tillegg målt og notert på papir, se Tabell 16 (kap.4). Det hadde vært en fordel å ha to trykkmålere slik at det var mulig å måle referansetrykket i 1. og 4. etasje samtidig, men grunnet lite utstyr var det ikke mulig.



Figur 25. Kobling av trykkmåler, DPM.



Figur 26. Montering av plastrør i dør i første etasje.



Figur 27. Plastslange på pall ved måling av referansetrykk i 1. etasje.

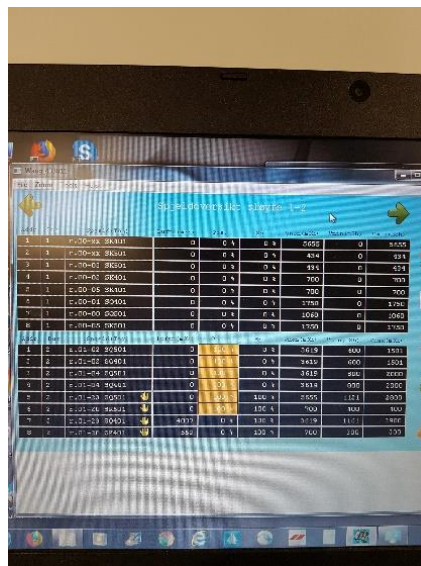


Figur 28. Montering av plastslange gjennom dør i 4. etasje.

3.4.3 Lufttetthetsmåling

Ved lufttetthetsmålingen ble trykkdifferansen over fasaden målt i 1. og 4. etasje, samme som ved måling av referansetrykk. Også her ville det vært en fordel med en ekstra trykkmåler slik at det hadde vært mulig å måle trykkdifferansen i 1. og 4. etasje samtidig med måling av luftmengde i ventilasjonsaggregatet. Siden måling av trykkdifferanse over fasade skal måles samtidig med trykkfall og luftmengde i ventilasjonsaggregat er det viktig å ha kontinuerlig kontakt gjennom målingene og notere ned tidspunktet resultatene ble avlest.

Lufttetthetsmålingene ble først utført i første etasje og senere repetert i fjerde etasje. Trykkdifferansen over fasaden som ble oppnådd ved et turtall på 100% var først mye lavere enn forventet, ca. 12 Pa. Siden ventilasjonsanlegget nettopp var innregulert var det to spjeld i kantinen som begynte å strup, fordi angitt luftmengde var mye høyere enn hva systemet var regulert for. Alle spjeld i kanalsystemet i kantinen ble derfor tvangsstyrt til full åpning (0%), se Figur 29. Med alle spjeld i maksimal åpningsposisjon startet måling av trykkdifferansen ved turtall på 100% på nytt. Et turtall på 100% tilsvarer 100% åpning på spjeldene i aggregatet. Trykkdifferansen ble målt med turtall fra 100%-40% tilluft, med 10% redusering av vifteeffekt ved hver måling. Totalt syv punkter med lik avstand mellom hvert punkt. Det ble ikke gjort målinger ved turtall lavere enn 40% da det ikke påvirket trykkdifferansen over klimaskjermen. Ved endt måling ble all teip fjernet og bygget ble returnert til den tilstanden det var i før målingene startet.



ID	Posisjon	Effekt	Åpning	Stilling	Åpning	Stilling
1	1	F-100-01	0	0	0	0
2	1	F-100-02	0	0	0	0
3	1	F-100-03	0	0	0	0
4	1	F-100-04	0	0	0	0
5	1	F-100-05	0	0	0	0
6	1	F-100-06	0	0	0	0
7	1	F-100-07	0	0	0	0
8	1	F-100-08	0	0	0	0
9	1	F-100-09	0	0	0	0
10	1	F-100-10	0	0	0	0
11	1	F-100-11	0	0	0	0
12	1	F-100-12	0	0	0	0
13	1	F-100-13	0	0	0	0
14	1	F-100-14	0	0	0	0
15	1	F-100-15	0	0	0	0
16	1	F-100-16	0	0	0	0
17	1	F-100-17	0	0	0	0
18	1	F-100-18	0	0	0	0
19	1	F-100-19	0	0	0	0
20	1	F-100-20	0	0	0	0

Figur 29. Tvangsstyring av spjeld i kanalsystem.

4. Resultater og diskusjon

Grunnet liten tid ble det kun utført målinger med overtrykk. Dette ble gjort ved å stenge og forsegle avtrekksviften og la tilluftsviften kjøre. Det er anbefalt å måle både ved over- og undertrykk da resultatene kan være forskjellige pga. «ventileffekten» som kan oppstå ved utadslående vinduer og dører da disse ofte suges tettere ved undertrykksmålinger. Selv om det er anbefalt å utføre undertrykksmålinger dersom det kun er tid til en måling vil ofte lekkasjetallet være høyere ved overtrykksmålinger. Det er derfor gjort en beslutning om at dersom lekkasjetallet som oppnås ved denne testen tilfredsstillende vil også lekkasjetallet være godkjent ved en undertrykksmåling.

Det var ikke mulig å overføre de loggede dataene fra trykkmålingen til en datamaskin, slik at referansetrykkene og trykkdifferansene som er benyttet i dette kapittelet kun er trykk som ble notert ved målingene. Dette vil ikke kunne gi en optimal oversikt over hvordan trykkdifferansen endrer seg i henhold til angitte luftmengder og vil ikke kunne vise når dører ble åpnet under målingene.

4.1 Referansetrykk

Resultatene av referansetrykket er vist i tabell 16. Som det tydelig framgår av tabellen er det en måling som skiller seg ut, referansetrykk i 4. etasje før måling. Det er vanskelig å si hva som er grunnen til dette, men en mulig årsak kan være at trykket ikke hadde stabilisert seg da ytterdørene i bygget stadig ble åpnet og lukket. En annen grunn kan være skorsteinseffekten. Dersom skorsteinseffekten skal være utslagsgivende kreves en stor temperaturforskjell mellom inne og ute. I henhold til CAN/CGSB-149.15 skal utetemperaturen være minst 5°C ved bygg opp til 10 etasjer. Utetemperatur før målingene startet ble målt til 5,9°C. I ISO 9972 står det at dersom produktet av innetemperatur/utetemperatur i Kelvin ganget med byggets høyde er > 250mK vil det være lite sannsynlig å oppnå nullstrømning. Produktet beregnes etter følgende formel:

$$(T_{inne} - T_{ute}) * H_{bygg} = ((18 + 273) - (5,9 + 273))K * 14,9m = \underline{180,29 mK} \quad (4.1)$$

Som formelen viser er produktet av temperatur og høyde innenfor anbefalt krav i standarden. På bakgrunn av dette vil det være naturlig å konkludere med at referansetrykket som er målt i 4. etasje før måling ikke er representativ for målingene. Ved videre beregninger i oppgaven er det derfor valgt å benytte samme referansetrykk for 1. og 4. etasje før måling, da dette tallet er mer realistisk. Ved å gjøre dette oppfylles også kravet i standarden om at absoluttverdien av gjennomsnittet av de målte verdiene ikke skal overskride 5 Pa. Dersom dette skjer skal testen erklæres ugyldig. Det er

viktig å merke seg at gjennomsnittet gjelder ved hver måling, altså gjennomsnitt av referansetrykk i 1. etasje før måling, gjennomsnitt av referansetrykk i 1. etasje etter måling osv.

Tabell 16. Målt referansetrykk.

	Før måling <i>Pa</i>	Etter måling <i>Pa</i>
1. etg.	1,5	3
4. etg	9 (1,5)	2

4.2 Trykkdifferanse over klimaskjerm

I henhold til ISO 9972 skal høyeste trykkdifferanse over klimaskjermen være minst 50 Pa. Det finnes likevel unntak dersom lufttetthetsmålingen utføres i store bygg og utstyret som benyttes for å trykksette bygget ikke har kapasitet til å oppnå en trykkdifferanse på 50 Pa. Ved slike tilfeller kan testen likevel erklæres gyldig dersom det er mulig å oppnå en trykkdifferanse på 25 Pa. Som Tabell 17 viser er høyeste målte trykkdifferanse 22,5 Pa for måling 1, som er lavere enn hva standarden tillater. Tabell 18 viser at det ved måling 2 ble oppnådd en trykkdifferanse på 25 Pa, som akkurat tilfredsstiller minstekravet. For å kunne oppnå den induserte trykkdifferansen skal målt trykkdifferansen korrigeres for referansetrykk etter følgende formel:

$$\Delta p = \Delta p_m - \frac{\Delta p_{0,1} + \Delta p_{0,2}}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (4.2)$$

hvor:

Δp er indusert trykk [Pa]

Δp_m er målt trykk [Pa]

$\Delta p_{0,1}$ er gjennomsnittlig referansetrykk før test [Pa]

$\Delta p_{0,2}$ er gjennomsnittlig referansetrykk etter test [Pa]

Etter å ha korrigert trykkdifferansene synker trykket og måling 2 er dermed ikke lenger innenfor kravet om en trykkdifferanse på 25 Pa. I henhold til ISO 9972 skal laveste trykkdifferanse være 10 Pa (± 3 Pa kan tillates) eller fem ganger verdien av referansetrykket. Den som er størst benyttes.

Som en konsekvens av den lave trykkdifferansen som er oppnådd er også laveste målte trykk ikke i henhold til standarden.

Som det fremgår av tabellen for måling 1 er trykkdifferansen ved turtall på 80% høyere enn ved 90% turtall. En forklaring på dette er at ved første måling ble ikke turtallet justert ned med lik avstand. Målingene startet ved 100% og deretter ned til 80% og videre til 60% før det ble justert opp til 70%. Herfra ble turtallet justert ned til 50% og 40% før det til slutt ble justert opp til 90%. Ved å styre turtallet på denne måten blir det vanskelig å finne riktig trykk da luftmengdene endres veldig mye og det tar tid før trykket stabiliserer seg. I tillegg ble ytterdører åpnet, som medfører vanskeligheter med å opprettholde riktig trykk. Ved måling 2 ble turtallet redusert fra 100%-40% med intervall på 10%. Som Tabell 18 viser er avstanden mellom hver målte trykkdifferanse jevnere ved måling 2 enn ved måling 1. Dette fremgår i tillegg tydelig av lekkasjefrafene i kapittel 4.4.

Tabell 17. Målt og korrigert trykkdifferanse ved måling 1.

Tidspunkt	Turtall	Trykkdifferanse over fasade	Korrigert trykkdifferanse
	%		Pa
13:14	100	22,5	20,25
13:31	90	16	13,75
13:17	80	17	14,75
13:21	70	13	10,75
13:20	60	11	8,75
13:24	50	5,5	3,25
13:26	40	4	1,75

Tabell 18. Målt og korrigert trykkdifferanse ved måling 2.

Tidspunkt	Turtall	Trykkdifferanse over fasade	Korrigert trykkdifferanse
	%		Pa
13:42	100	25	23,25
13:43	90	21	19,25
13:44	80	16,5	14,75
13:45	70	12	10,25
13:46	60	8,8	7,05
13:48	50	6	4,25
13:50	40	5,5	3,75

Ved måling av trykkfall over roterende varmegjenvinner og trykkfall over dyseinnløp er det oppnådd trykk som er betydelig høyere enn trykkdifferansen som er oppnådd over fasade, se vedlegg 7.5. I vedlegget er det i tillegg angitt målt statisk trykk i tilluftskanal på 281 Pa. Grunnet høyt trykk i kanal vil ikke viften har god nok kapasitet til fordele hele luftmengden helt til tilluftsventilen. Den luftmengden som er målt i aggregatet vil dermed ikke være den samme som tilføres rommet via tilluftskanalene. Dette vil også være grunnen til at luftmengdene som er vist i Figur 29 er lavere enn luftmengde målt i aggregatet, se vedlegg 7.6.

Selv om beregninger av aggregatets kapasitet viste at det ville være mulig å oppnå høyere trykkdifferanse var ikke dette tilfellet ved målingene. En mulig grunn kan være at dører ofte ble åpnet, som medførte at det var vanskelig å opprettholde trykket inne i bygget. Dersom det store aggregatet hadde vært benyttet ville nok trykkdifferansen over fasaden vært større da aggregatet har bedre kapasitet.

Et annet punkt som er verdt å merke seg ved trykkdifferansene er at det ble oppnådd høyere trykkdifferanse i 4. etasje. Det ville vært naturlig å tro at den høyeste trykkdifferansen ble målt i 1. etasje, som er rett ved tilluftsventilene for aggregatet. Høyere trykkdifferanse i 4. etasje kan oppstå som følge av skorsteinseffekt eller vind. Som nevnt tidligere vil skorsteinseffekten være den dominerende drivkraften ved vindhastighet lavere enn 3,5 m/s. Høyeste målte vindhastighet i løpet av måleperioden var, iht. www.yr.no, 2,7 m/s. Selv om det ikke er store forskjeller mellom de målte trykkdifferansene vil det være naturlig å anta at trykkdifferansen blir litt høyere som følge av drivkrefter fra skorsteinseffekten og vind. En annen faktor kan være at færre dører ble åpnet når målingene ble utført i 4. etasje, men det er vanskelig å si noe om, og siden trykkdifferansen er høyere ved alle målte punkter anses ikke dette som en avgjørende faktor.

4.3 Korrigering av luftmengde

I aggregatet ble luftmengden målt gjennom roterende varmegjenvinner og gjennom dyseinnløp [48], se vedlegg 7.6. Hensikten med å måle luftmengden to steder i aggregatet er å kontrollere at målingene er utført riktig, men som resultatene i vedlegget viser er det et betydelig avvik mellom de målte luftmengdene. Det er ikke funnet en god forklaring på hvorfor det er blitt slik, og det er i tillegg gjort ekstra målinger på skolens ventilasjons-lab [48] uten å finne en forklaring. En mulig grunn kan være at luftmengdene ikke ble målt på samme måte. Luftmengdene gjennom roterende varmegjenvinner ble målt med Swema 3000, mens luftmengdene gjennom dyseinnløpet ble målt med aggregatets innebygde målesystem og avlest på styringspanelet. Siden usikkerheten ved Swema 3000 er lavere grunnet mindre instrumentfeil og avlesningsfeil, enn ved avlesning på

styringspanelet, er troen på luftmengdene gjennom roterende varmegjenvinner størst. Lekkasetallene som er beregnet, kap. 4.4-4.5, og luftmengdene i Figur 29 underbygger også troen på at luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner er mest pålitelig. Det er likevel tatt hensyn til begge luftmengdene ved beregning av nødvendig luftmengde.

Luftmengdene som er målt gjennom dyseinnløp og gjennom roterende varmegjenvinner er korrigert for temperaturforskjell mellom rom og aggregat [48], se vedlegg 7.6. Luftmengden må korrigeres videre for å finne luftmengden som lekker gjennom klimaskjermen. Ved korrigering benyttes formel for overtrykksmålinger fra punkt 6.2 i ISO 9972:

$$q_{env} = q_m \left(\frac{\rho_e}{\rho_{int}} \right) \approx q_m \left(\frac{T_{int}}{T_e} \right) \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.3)$$

hvor:

ρ_{int} innvendig luftdensitet [kg/m^3]

ρ_e utvendig luftdensitet [kg/m^3]

T_{int} innvendig absolutt temperatur [K]

T_e utvendig absolutt temperatur [K]

Variasjoner i temperatur har en betydelig påvirkning på densiteten til gasser, og det vil derfor generelt være mer nøyaktig å korrigere luftmengdene i henhold til temperaturendringer.

4.3.1 Korrigerings av luftmengde gjennom dyseinnløp

Tabell 19 og Tabell 20 viser de korrigerede luftmengdene for måling 1 og måling 2 med tilhørende trykkdifferanse over klimaskjerm. Det er benyttet samme temperatur ved de to målingene. Som innetemperaturen er det benyttet 18°C , mens for utetemperaturen er det benyttet en gjennomsnittlig temperatur på $10,3^\circ\text{C}$, som er et gjennomsnitt av temperatur før, etter og underveis i målingene.

Tabell 19. Korrigerte luftmengder gjennom dyseinnløp for måling 1 med tilhørende trykkdifferanse.

Korrigert luftmengde	Korrigert trykkdifferanse
<i>m³/h</i>	<i>Pa</i>
727,13	1,75
854,99	3,25
1020,45	8,75
1142,91	10,75
1289,69	14,75
1402,19	13,75
1531,94	20,25

Tabell 20. Korrigerte luftmengder gjennom dyseinnløp for måling 2 med tilhørende trykkdifferanse.

Korrigert luftmengde	Korrigert trykkdifferanse
<i>m³/h</i>	<i>Pa</i>
726,72	3,75
863,18	4,25
1026,94	7,05
1168,36	10,25
1294,52	14,75
1415,11	19,25
1525,93	23,25

4.3.2 Korrigering av luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner

Korrigering av luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner er utført på samme måte og med samme temperatur som for luftmengde gjennom dyse. Resultatene er vist i Tabell 21 og Tabell 22.

Tabell 21. Korrigerte luftmengder gjennom roterende varmegjenvinner for måling1 med tilhørende trykkdifferanse

Korrigert luftmengde	Korrigert trykkdifferanse
<i>m³/h</i>	<i>Pa</i>
1628,12	1,75
2217,57	3,25
2836,09	8,75
3487,34	10,75
4155,77	14,75
4763,09	13,75
5558,14	20,25

Tabell 22. Korrigerte luftmengder gjennom roterende varmegjenvinner for måling 2 med tilhørende trykkdifferanse.

Korrigert luftmengde	Korrigert trykkdifferanse
<i>m³/h</i>	<i>Pa</i>
1597,19	3,75
2187,16	4,25
2811,05	7,05
3440,39	10,25
4105,56	14,75
4794,78	19,25
5489,37	23,25

4.4 Luftlekkasjefraf

Resultatet av de korrigerte luftmengdene og de korrigerte trykkdifferansene fremstilles i en lekkasjefraf, og ut fra grafen kan en kontrollere om testresultatene er gyldige i henhold til ISO 9972. Kravene som stilles her er at n skal ligge mellom 0,5-1,0 og at R^2 ikke skal være lavere enn 0,98.

4.4.1 Lekkasjefraf for luftmengde gjennom dyseinnløp

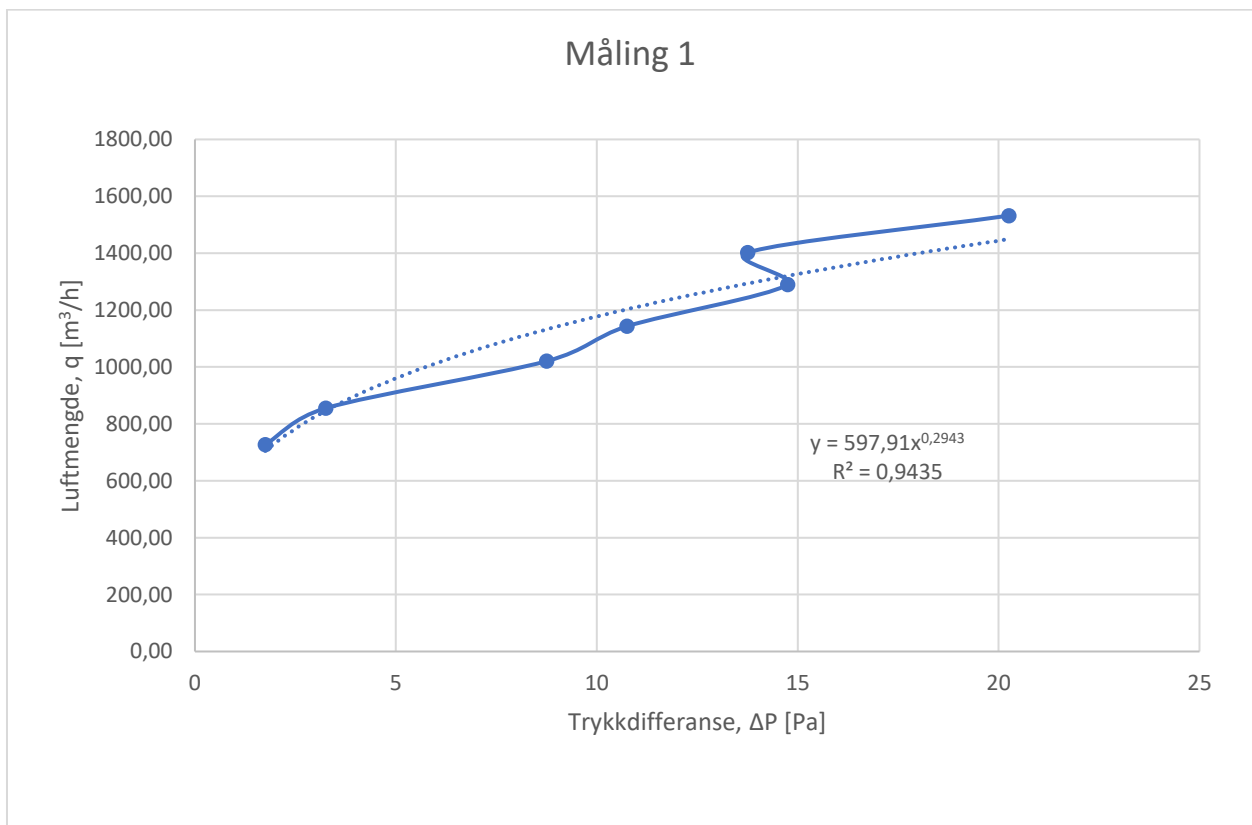
Grafene i Figur 30 og Figur 31 viser sammenhengen mellom luftmengde gjennom dyseinnløp og trykkdifferanse. Den heltrukne linjen viser målekurven, mens den stiplede linjen er en tilhørende regresjonskurve. Ved regresjon finner man en funksjon, $f(x)$, som på best mulig måte samsvarer med de angitte verdiene. Ved regresjon for måling 1 får en følgende kraftlikning:

$$q = 597,91 * \Delta P^{0,29} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.4)$$

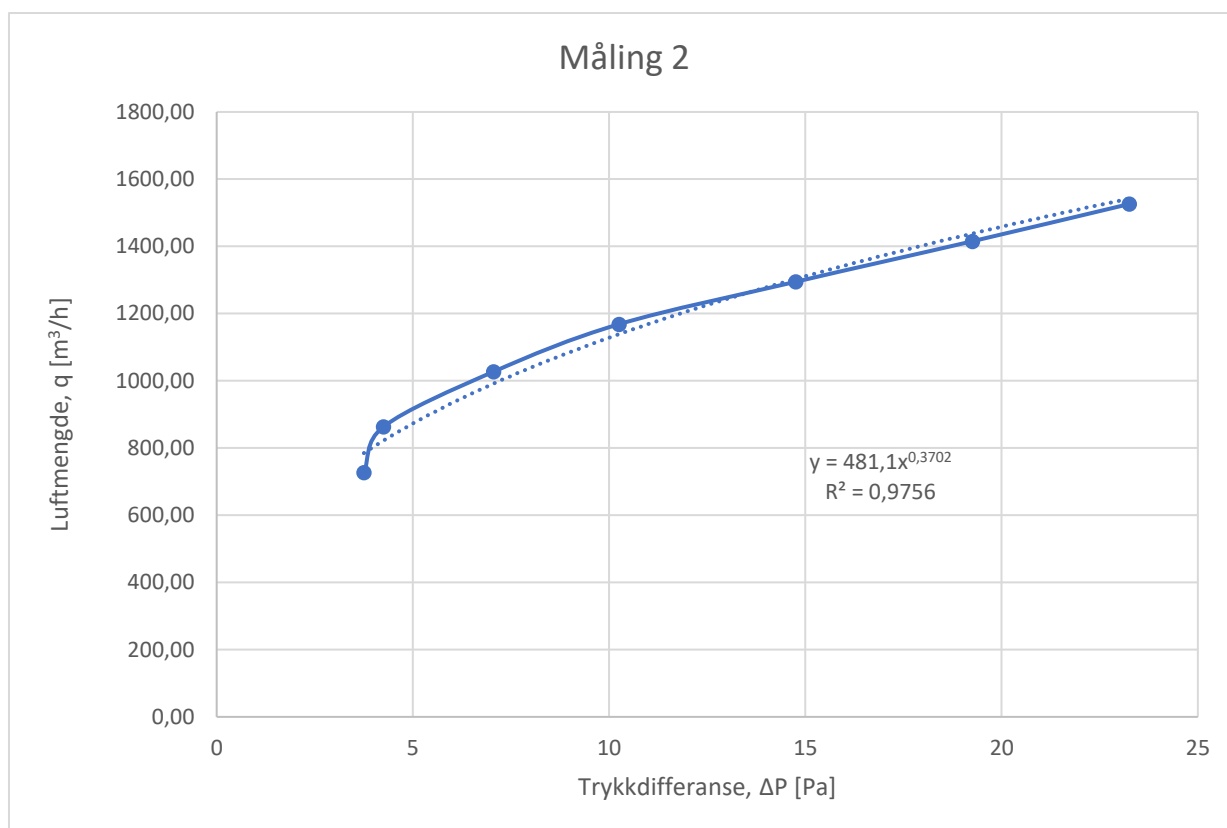
hvor lekkasjekoeffisienten, C, er $597,91 \text{ m}^3/\text{hPa}$ og lekkasjeeksponenten, n, er 0,29. Regresjonskoeffisienten, R^2 , er 0,94. For måling 2 er følgende likning gitt:

$$q = 481,1 * \Delta P^{0,37} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.5)$$

hvor lekkasjekoeffisienten, C, er $481,1 \text{ m}^3/\text{hPa}$ og lekkasjeeksponenten, n, er 0,37. Regresjonskoeffisienten, R^2 , er 0,98



Figur 30. Lekkasjefraf for måling 1, luftmengde gjennom dyseinnløp.



Figur 31. Lekkasje graf for måling 2, luftmengde gjennom dyseinnløp.

Ut fra grafene kan en se at det er bra samsvar mellom målekurve og regresjonskurve ved måling 2, men at det er større avvik ved måling 1. Dette kan også begrunnes ved regresjonskoeffisienten, R^2 . Regresjonskoeffisienten, R^2 , sier noe om hvor godt modellen passer til dataene og er et uttrykk for hvor mye usikkerheten er blitt redusert etter at modellen er estimert. Dersom $R^2 = 1$ tilsvarer dette perfekt eksponentiell sammenheng mellom luftmengde og trykkdifferanse. Ved $R^2 = 0$ vil det være ingen eksponentiell sammenheng mellom luftmengde og trykkdifferanse. I begge tilfellene er $R^2 > 0,9$, som tilsier at usikkerheten ved modellen er lav, men kun måling 2 oppfyller kravet i ISO 9972 om $R^2 \geq 0,98$.

Store avvik mellom målekurven og regresjonskurven kan indikere avvik i målebetingelser eller utstyr. Slike avvik kan være dører som åpnes, tetninger som er revet av eller usikkerhet ved måleutstyr. Det er her viktig å huske på at trykkdifferansene som er benyttet kun er avlesninger og dermed ikke like nøyaktig som ved logging av trykk ved trykkmåler.

Dersom lekkasjeekspONENTEN n er lav, slik som i dette tilfellet, kan det tyde på store åpninger og hull i klimaskjermen. En mulig forklaring på dette er alle dørene som til stadighet ble åpnet og lukket under trykktesten. En høy eksponent tyder på at det er smale sprekker eller lekkasjer

gjennom materialene. På bakgrunn av dette er det naturlig å konkludere med at klimaskjermen i utgangspunktet er tett, at de fleste tettinger av toalett og vasker har holdt seg og at det er åpningen av dører som har påvirket lekkasjeeksponenten. Effekter av vind kan også påvirke lekkaseeksponenten, men ved måletidspunktet var vindhastigheten mindre enn 3 m/s og det antas derfor at vinden i liten grad har påvirket målingene. Ved måling 2 var det mange arbeidere som var ferdig på jobb og dermed mindre åpning av dører, noe som kan forklare at lekkasjeeksponenten er høyere enn ved måling 1.

4.4.2 Lekkasjegrav for luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner

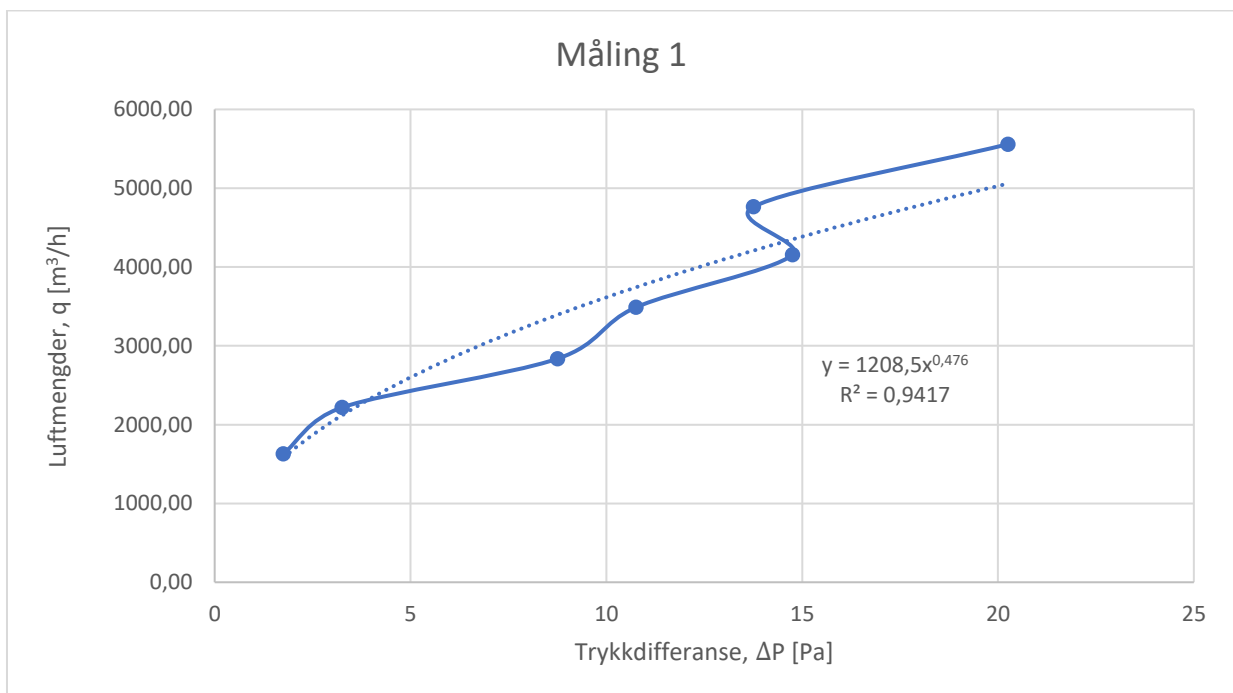
Lekkasjegravene for luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner er utført på samme måte som for luftmengde gjennom dyseinnløp, se Figur 32 og Figur 33. Ved regresjon for måling 1 får en følgende kraftlikning:

$$q = 1208,5 * \Delta P^{0,48} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.6)$$

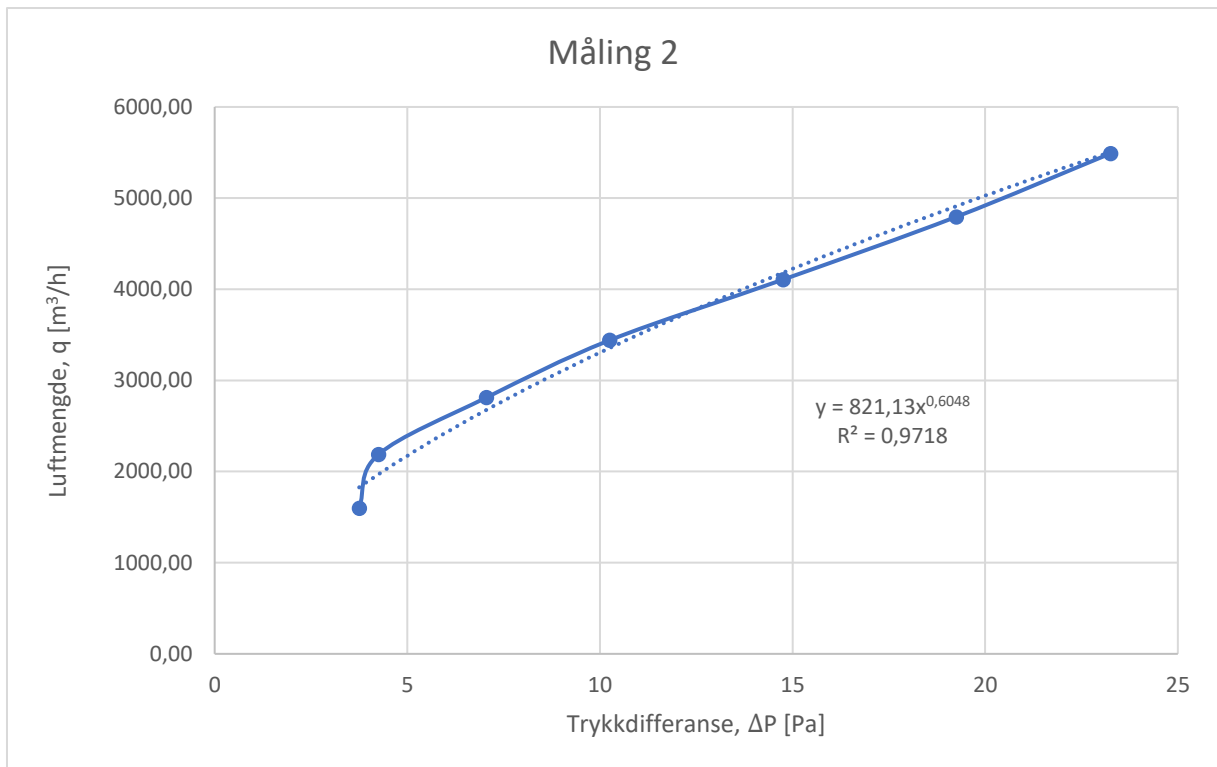
hvor lekkasjekoeffisienten, C, er 1208,5 m³/hPa og lekkasjeeksponenten, n, er 0,48. Regresjonskoeffisienten, R², er 0,94. For måling 2 er følgende likning gitt:

$$q = 821,13 * \Delta P^{0,6} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.7)$$

hvor lekkasjekoeffisienten, C, er 821,13 m³/hPa og lekkasjeeksponenten, n, er 0,6. Regresjonskoeffisienten, R², er 0,97.



Figur 32. Lekkasjegrav for måling 1, luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner.



Figur 33. Lekkasje graf for måling 2, luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner.

Lekkasje grafene for luftmengdene gjennom roterende varmegjenvinner er ganske lik lekkasje grafene for luftmengde gjennom dyseinnløp. Den største forskjellen er at lekkasjetallet for luftmengdene gjennom roterende varmegjenvinner er høyere og lekkasjekoeffisienten er nesten doblet som følge av større luftmengder. Ved måling 2 ble det oppnådd en lekkasje eksponent på 0,6, som er i henhold til kravet i ISO 9972. Tabell 23 viser en oversikt over hvilke lekkasjetall og lekkasjekoeffisienter som er oppnådd.

Tabell 23. Beregnet verdi for lekkasjekoeffisient, C , og lekkasje eksponent, n , iht. lekkasje graf.

	Luftmengde gjennom dyseinnløp:		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:	
	Måling 1	Måling 2	Måling 1	Måling 2
C [m^3/hPa]	597,91	481,1	1208,5	821,13
n [-]	0,29	0,37	0,48	0,6

4.4.3 Beregning av nødvendig luftmengde og lekkasjetall

Siden det ikke var mulig å oppnå nødvendig trykkdifferanse på 50 Pa må man ekstrapolere for å oppnå nødvendig luftmengde. Dette gjøres ved hjelp av kraftlikningen som er gitt ved regresjon av lekkasjefrafene. Leekkasjetallet beregnes etter formel (2.2). Tabell 24 viser resultatene etter beregning av nødvendig luftmengde og oppnådd lekkasjetall ved en trykkdifferanse på 50 Pa. Resultatene fraviker fra lekkasjetallet på $0,4 \text{ h}^{-1}$, som ble beregnet når AF Gruppen utførte sin lufttetthetsmåling med blower door. Noen av faktorene som påvirker denne differansen er at ved lufttetthetsmåling ved blower door var heisen forseglet. Dette ble ikke gjort ved måling med ventilasjonsaggregatet. En annen faktor er at AF Gruppen hadde mulighet til å stenge ned hele bygget slik at dører og andre tettinger ikke ble åpnet/brutt. Ekstrapolering opp til 50 Pa medfører også en usikkerhet da høyeste målte trykkdifferanse var 23,25 Pa, som kun er halvparten av ønsket trykkdifferanse. Som det fremkommer av tabellen under er det store forskjeller på nødvendig luftmengde og lekkasjetall for luftmengde gjennom dyseinnløp og gjennom roterende varmegjenvinner.

Tabell 24. Nødvendig luftmengde og lekkasjetall beregnet etter lekkasjefraf.

	Luftmengde gjennom dyseinnløp:		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:	
	Måling 1	Måling 2	Måling 1	Måling 2
$q_{50} [\text{m}^3/\text{h}]$	1890,79	2047,36	7902,28	8586,06
$n_{50} [\text{h}^{-1}]$	0,20	0,22	0,85	0,92

4.5 Beregning av nødvendig luftmengde og lekkasjetall iht. ISO 9972

Selv om det er mulig å få kraftlikningen fra lekkasjefrafen vil det likevel være en usikkerhet ved resultatet da en ikke vet hvordan verdiene er behandlet i Excel. Det er derfor valgt å beregne luftlekkasjehastigheten etter formler i tillegg C i ISO 9972 for å kunne sammenligne. Standarden sier ikke noe om at verdiene som benyttes for å beregne nødvendig luftmengde skal være et gjennomsnitt av alle målinger i ett punkt eller om det kun benyttes en måling ved hvert punkt. Ved beregning ble det funnet at resultatene for én måling ved hvert punkt samsvarer med resultatene fra lekkasjefrafene. Det er derfor valgt å beregne nødvendig luftmengde etter formlene i standarden. Det vil også her være nødvendig å ekstrapolere opp til 50 Pa. Fullstendige resultater finnes i vedlegg 7.8.

Standarden inneholder flere avledende mengder som ofte benyttes for å uttrykke bygningens eller testsonens luftpermeabilitet. Det er da anbefalt å benytte følgende metode: alle utledede mengder avhenger av estimering av lekkasjekoeffisienten, C , og lekkasjeeksponenten, n , fra følgende formler:

$$q_{env} = C_{env}(\Delta P)^n \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.8)$$

hvor:

q_{env} er strømningshastigheten gjennom klimaskjermen [m^3/h]

C_{env} er luftstrømningskoeffisienten [m^3/hPa]

$$C = C_{env} \left(\frac{T_0}{T_{int}} \right)^{n-1} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.9)$$

hvor:

C er lekkasjekoeffisienten oppnådd ved korreksjon av luftstrømningskoeffisienten, C_{env} , til standard forhold, 20°C og 1 atmosfære ($1,013 \cdot 10^5$ Pa)

T_0 er absoluttemperatur ved standard forhold [K]

T_{int} er innvendig absoluttemperatur [K]

Ved undertrykksmålinger benyttes utvendig absoluttemperatur, T_e .

Det er utarbeidet en logaritmisk transformasjon av variablene q og ΔP for hver avlesing for å bestemme C og n , se vedlegg 7.8. Siden det er målt trykkdifferanse over klimaskjerm ved syv punkter vil antall testavlesninger være $N=7$. De logaritmiske transformasjonene brukes for å beregne gjennomsnitt og empirisk varians for q og ΔP , som igjen benyttes for å gi et estimat av C_{env} og n . For å finne C korrigeres C_{env} etter formel (4.9). Tabell 25 viser resultatet av lekkasjekoeffisientene og lekkasjeeksponentene ved hver måling. Ved sammenlikning med resultater fra lekkasjegrafen, Tabell 23, kan en se at resultatene er tilnærmet like.

Tabell 25. Beregnet verdi for lekkasjekoeffisient, C, og lekkasjeeksponent, n, iht. ISO 9972.

	Luftmengde gjennom dyseinnløp:		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:	
	Måling 1	Måling 2	Måling 1	Måling 2
C [m ³ /hPa]	600,82	483,18	1212,84	830,9
n [-]	0,29	0,37	0,48	0,6

For hver av målingene er det utarbeidet en regresjonslikning. For luftmengde gjennom dyse er det utarbeidet følgende likninger for måling 1 og måling 2:

$$q = 600,82 * \Delta P^{0,29} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.10)$$

$$q = 483,18 * \Delta P^{0,37} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.11)$$

For luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner er det utarbeidet følgende likninger for måling 1 og måling 2:

$$q = 1212,84 * \Delta P^{0,48} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.12)$$

$$q = 830,9 * \Delta P^{0,6} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (4.13)$$

Når lekkasjekoeffisienten og lekkasjeeksponenten er beregnet kan luftmengden beregnes etter formel (2.6) og lekkasjetallet etter formel (2.2). Resultatet er vist i Tabell 26. Resultatene for luftmengdene fraviker litt fra resultatene gitt i Tabell 24. Grunnen til avviket er trolig at ved beregning av lekkasjekoeffisienten, C, etter ISO 9972 beregnes først en luftstrømningskoeffisient, C_{env}, som videre korrigeres for standard forhold. Ved beregning etter lekkasjegrafene korrigeres ikke lekkasjekoeffisienten.

Tabell 26. Nødvendig luftmengde og lekkasjetall beregnet etter ISO 9972.

	Luftmengde gjennom dyseinnløp		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner	
	Måling 1	Måling 2	Måling 1	Måling 2
q ₅₀ [m ³ /h]	1868,3	2054,6	7930,66	8688,22
n ₅₀ [h ⁻¹]	0,20	0,22	0,85	0,93

I likhet med resultatene beregnet ut fra lekkasjegrafen er det også her store forskjeller på nødvendig luftmengde og lekkasjetall.

4.6 95% konfidensintervall

Et konfidensintervall er en måte å angi feilmarginer ved en måling eller beregning. Ved å benytte et 95% konfidensintervall angis intervallet som med 95% sannsynlighet kan si at gjennomsnittet for populasjonen ligger innenfor. Ved beregning av konfidensintervallet benyttes en t-test (Student's test). En t-test brukes for å sammenligne to små prøver for å se om det finnes en signifikant forskjell.

Konfidensintervallet er beregnet etter formler i vedlegg 7.9 for lekkasjetallet, C , og lekkasjeeksponenten, n . Tabell 27 angir konfidensintervallet for n og C ved luftmengde gjennom dyseinnløp, mens Tabell 28 angir konfidensintervallet for luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner. Dette betyr at det er 95% sannsynlighet for at de beregnede verdiene for lekkasjeeksponenten, n , og lekkasjekoeffisienten, C , ligger innenfor de beregnede intervallene.

Tabell 27. 95% konfidensintervall for luftmengde gjennom dyseinnløp.

	Måling 1	Måling 2
$(n - I_n, n + I_n)$	(0,21, 0,37)	(0,29, 0,45)
$\{Cexp[-I_{\ln(C)}], Cexp[I_{\ln(C)}]\}$	(499,42, 715,83)	(414,09, 559,0)

Tabell 28. 95% konfidensintervall for luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner.

	Måling 1	Måling 2
$(n - I_n, n + I_n)$	(0,35, 0,61)	(0,47, 0,73)
$\{Cexp[-I_{\ln(C)}], Cexp[I_{\ln(C)}]\}$	(886,4, 1647,7)	(625,8, 1095,6)

4.7 Feilkilder

Ved denne lufttetthetsmålingen er det flere feilkilder som har påvirket resultatet. Den største feilkilden er måling av luftmengder i aggregatet. Det ble her målt luftmengde gjennom dyseinnløp og gjennom roterende varmegjenvinner. Luftmengdene skal i utgangspunktet være lik, men med rom for mindre avvik. Resultatene fra målingen viser at det er store forskjeller i de målte luftmengdene. På bakgrunn av dette er det vanskelig å vite nøyaktig hva som er riktig luftmengde. En annen stor feilkilde er dører som stadig ble åpnet mens målingene pågikk. Siden antall personer som utførte testen ikke var nok til å holde vakt ved dørene er det ikke mulig å si noe om hvilke

dører som ble åpnet og hvor lenge de var åpne. Dette vil ha store konsekvenser for trykkdifferansen over klimaskjermen. Dersom det hadde vært mulig å logge alle målinger ved trykkmåleren hadde det vært lettere å se når dørene ble åpnet. Dette hadde også sikret en bedre avlesning av trykkdifferansene. Andre mindre feilkilder er tetninger som ble revet av underveis og heis som ikke ble forseglet. I tillegg vil det alltid være en liten usikkerhet knyttet opp mot måleutstyret. Feilkilde som følge av drivkrefter fra vind og skorsteinseffekt vil også kunne påvirke resultatet. Ved lave trykkdifferanser vil måleusikkerheten som følge av vind øke. Standarden angir en usikkerhet $< 10\%$ ved rolige værforhold.

Siden dette var første lufttetthetsmåling i et så stort bygg og målingene ble utført under tidspress var det ikke tid til å gå gjennom feilkilder og evt. rette disse mens målingene pågikk.

5. Konklusjon

Hensikten med denne masteroppgaven var å etablere en ny metode for å kvantifisere luftmengder i løpet av en lufttetthetsmåling ved å benytte byggets ventilasjonsaggregat. De utførte målingene bekrefter at det er mulig å utføre lufttetthetsmålinger i bygg ved å benyttes byggets ventilasjonsaggregat, selv om måleforholdene ikke er ideelle. Dette vil være med på å forenkle utførelsen av lufttetthetsmålinger da nødvendig utstyr begrenser seg til trykkmålere med tilhørende plastslanger, termometer, tetningsteip og evt. laseravstansmåler, i forhold til å ta med seg en automatisert vifte (blower door). Ved måling i store bygg vil det fort være nødvendig med mer enn en automatisert vifte.

Selv om resultatene fra feltstudiet på WANG Ung viser at det ikke var mulig å oppnå en tilstrekkelig trykkdifferanse over klimaskjermen iht. ISO 9972, var det fortsatt mulig å beregne en pålitelig luftmengde og tilhørende lekkasjetall ved en trykkdifferanse over klimaskjermen på 50 Pa. Dette ble gjort ved å benytte kraftlikningen som utledes fra forholdet mellom målt luftmengde og målt trykkdifferanse. Kraftlikningen ble utledet på to måter hvorav begge metodene ga tilnærmet likt resultat. Ved høye bygg bør trykkdifferansen måles ved laveste og høyeste etasje. Dette kan enkelt utføres ved å benytte en trykkmåler og plastslanger. Trykket skal måles ved hver angitte luftmengde og korrigeres iht. referansetrykk og temperaturforskjell mellom inne og ute. Det er stor usikkerhet om hvilken luftmengde som er riktig, men på bakgrunn av oppnådd lekkasjetall, trykk i tilluftskanal og luftmengde målt i kanal av servicetekniker er det antatt at luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner er mest pålitelig. Lekkasjetallene som ble oppnådd ved denne luftmengden er høyere enn hva AF Gruppen fikk ved sine målinger, men det var forventet.

Ved måling av referansetrykk var det ikke mulig å oppnå nullstrømning, men verdiene som ble målt (bortsett fra måling 1) var iht. krav i ISO. For å oppnå nullstrømning kreves det gode måleforhold iht. usikkerhet som følge av vind og temperatur og en tett klimaskjerm. Det vil være vanskelig å oppnå nullstrømning dersom: produktet av temperaturforskjellen mellom inne og ute multiplisert med byggets høyde > 250 mK, vindhastigheten overskrider 3 m/s nær bakken, 6 m/s ved meteorologisk vind eller når 3 på Baufortsskala.

Målingene ble ikke utført under ideelle forhold, som resulterte i at resultatene som er oppnådd ved denne målingen ikke er ideelle. For å oppnå en høyere luftmengde og høyere trykkdifferanse hadde det her vært en fordel å benytte det største aggregatet til å utføre målingene. En mer pålitelig trykkdifferanse og referansetrykk kunne vært oppnådd dersom det hadde vært mulig å måle trykket ved hver fasade, som er anbefalt, og tatt gjennomsnittet av disse. Ved måling på WANG Ung var ikke dette mulig. Det vil i tillegg være en fordel å måle trykket ved hver etasje, men det krever flere

testpersoner og flere trykkmålere. At målingene ble utført midt i arbeidstiden er ikke ideelt da dette påvirket målingene fordi klimaskjermen ikke ble holdt tett. Lufttetthetsmålinger bør ikke utføres dersom bygget ikke har en fullstendig klimaskjerm.

Dersom det hadde vært utført målinger i flere bygg ville det vært mulig å sammenligne resultater og utførelsen ville vært bedre grunnet mer erfaring. Erfaringen som erverves ved slike målinger kan benyttes for å lettere håndtere usikkerheter og resultatene underveis. Det bør beregnes god tid ved slike målinger, spesielt om bygget er stort og om måleforholdene ikke er ideelle.

6. Litteratur

- [1] J. Kronvall, «Testing of houses for air leakage using a pressure method,» *ASHRAE Transactions*, 84 (1), pp. 72-79, 1978.
- [2] P. Jackman, «Heat loss in buildings as a result of infiltration,» *Building Services Engineer*, pp. 6-15, 1974.
- [3] J. Jokisalo, J. Kurnitski, M. Korpi, T. Kalamees og J. Vinha, «Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses,» *Building and Environment* 44, pp. 377-387, 2009.
- [4] S. Chen, M. D. Levine, H. Li, P. Yowargana og L. Xie, «Measured air tightness performance of residential buildings in North China and its influence on district space heating energy use,» *Energy and Buildings*, nr. 51, pp. 157-164, 2012.
- [5] S. Holøs og T. Aurlien, «474.624. Luftlekkasjemåling av bygninger. Hensikt og vurdering,» *Byggforskserien*, 2014.
- [6] DiBK, Byggeteknisk forskrift (TEK17), 2017.
- [7] Standard Norge, «NS 3031:2014 Beregning av bygningers energiytelse. Metode og data,» Standard Norge, 2014.
- [8] W. P. Bahnfleth, G. K. Yuill og B. W. Lee, «RP-935: Protocol for Field Testing of tall Buildings to Determine Envelope Air Leakage Rate,» *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers Inc.*, 1998.
- [9] P. Blom og S. Uvsløkk, «Bygg tett! Prosjektrapport 98,» SINTEF Byggforsk, 2012.
- [10] The Energy Conservatory, Operation Manual for Model 3 and Model 4 Systems, 2012.
- [11] J.-W. Jeong, J. Firrantello, W. Bahnfleth, J. Freihaut og A. Musser, «Case studies of building envelope leakage measurement using an air-handler fan pressurisation approach,» *Building Services Engineering Research & Technology* 29, pp. 137-155, 2008.
- [12] M.-H. Kim, J.-H. Jo og J.-W. Jeong, «Feasibility of building envelope air leakage measurement using combination of air-handler and blower door,» *Energy and buildings* 62, pp. 436-441, 2013.
- [13] D.-S. Lee, J.-W. Jeong og J.-H. Jo, «Experimental study on airtightness test methods in large buildings; proposal of averaging pressure difference method,» *Building and Environment* 122, pp. 61-71, 2017.
- [14] C. Y. Shaw, D. M. Sander og G. T. Tamura, «Air leakage measurements of the exterior walls of tall buildings,» *ASHRAE Transactions* 79, pp. 40-48, 1973.
- [15] C. Y. Shaw, J. T. Reardon og M. S. Cheung, «Changes in air leakage levels of six Canadian office buildings,» *ASHRAE Journal*, 1993.

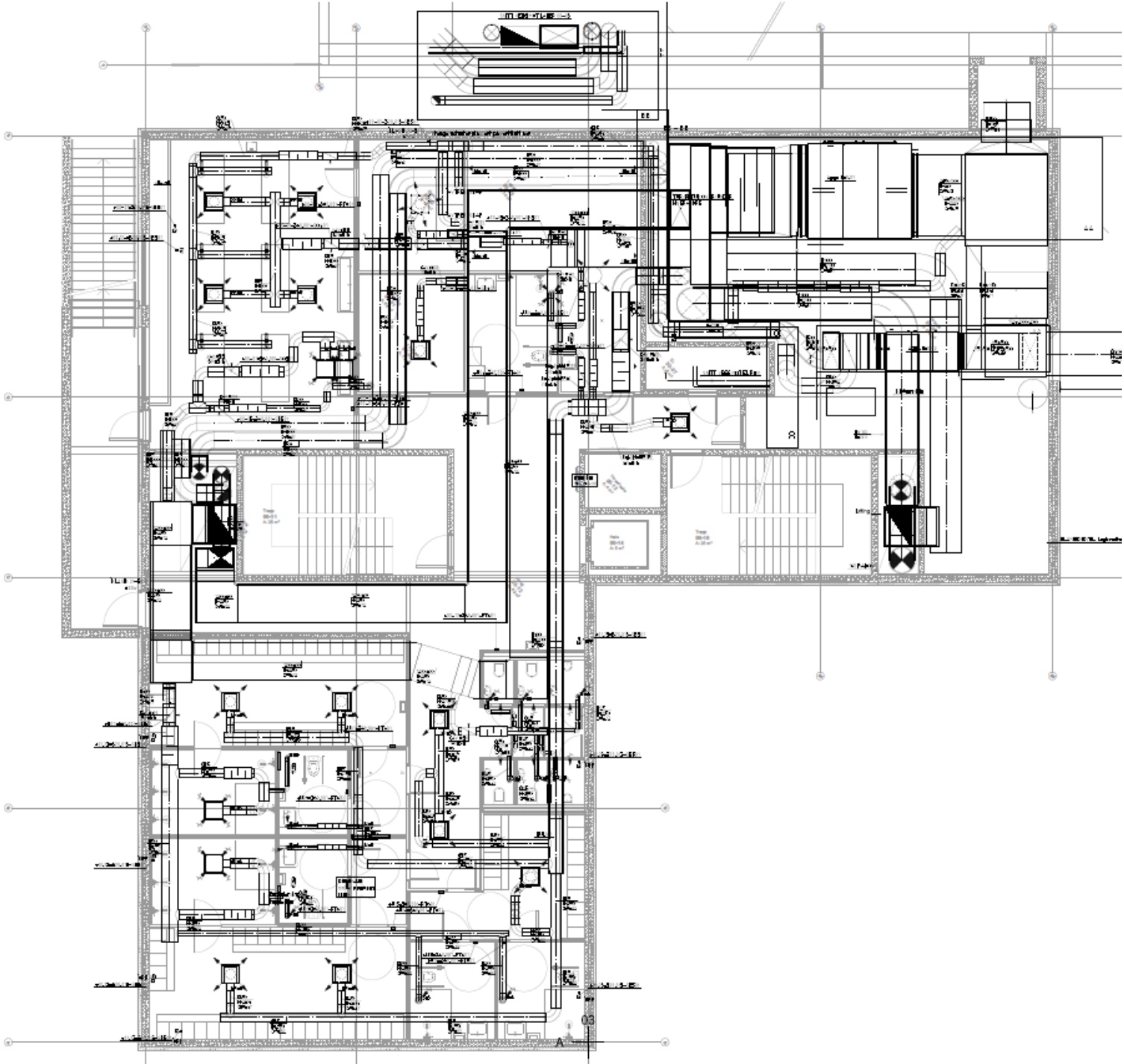
- [16] ASTM, «ASTM Standard E779-92, Standard test method for determining air leakage rate by fan pressurization,» American Society for Testing and Materials, 1992.
- [17] Canadian General Standards Board, «Determination of the overall envelope airtightness of buildings by the fan pressurization method using the buildings air handling system,» 1996.
- [18] I. Hole og T. Aurlen, «520.401. Lufttetting av bygninger. Framgangsmåte for å oppnå lavt lekkasjetall,» *Byggforskserien*, 2013.
- [19] F. R. Carrié, R. Jobert og V. Leprince, «Methods and techniques for airtight buildings,» International Energy Agency, 2012.
- [20] A. Bjørnulf og I. Bryn, «Glass i fasader og lufttetthet,» Erichsen & Horgen AS og Glass og Fasadeforeningen.
- [21] D. Kraniotis, «Dynamic characteristics of wind-driven air infiltration in buildings - The impact of wind gusts under unsteady wind conditions,» 2014.
- [22] M. W. Liddament, «Air Infiltration Calculation Techniques - An Applications Guide,» Air Infiltration and Ventilation Centre, 1986.
- [23] Air Infiltration Center, «Wind Pressure Workshop Proceedings AIC-TN-13.1-84,» Brussel, 1984.
- [24] F. R. Carrié og V. Leprince, «Uncertainties in building pressurisation tests due to steady wind,» *Energy and buildings 116*, pp. 656-665, 2016.
- [25] Technical Committee CEN/TC 156, «prEN 15242 Ventilation for buildings - Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration,» European Standard, 2006.
- [26] C.-Y. Shaw, «Correlation between Air Infiltration and Air Tightness for Houses in,» *National Research Council Canada*, pp. 333-341, 1981.
- [27] W. A. Anis, «The Impact of Airtightness On System Design,» *ASHRAE Journal*, 2001.
- [28] L. Ricketts, G. Finch og R. Bombino, «Air Leakage Control in Multi-Unit Residential Buildings. Development of Testing and Measurements Strategies to Quantify Air Leakage in MURBS,» 2013.
- [29] ASHRAE, *ASHRAE Handbook Fundamentals*, 2017.
- [30] J. Straube, «BSD-014: Air Flow Control in Buildings,» *Building Science Corporation*, 2007.
- [31] M. Sherman og R. Chan, «Building Airtightness: Research and Practice,» 2004.
- [32] Standard Norge, «NS 3700:2013 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Boligbygninger,» Standard Norge, 2013.
- [33] Standard Norge, «NS 3701:2012 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger. Yrkesbygg,» Standard Norge, 2012.

- [34] CIBSE, «Testing buildings for air leakage,» *CIBSE Technical Memoranda TM23: 2000*, 2000.
- [35] D. G. Colliver, «A predictive method to determine the leakage area needed in residences».
- [36] Standard Norge, «NS-EN ISO 9972:2015 Bygningers termiske egenskaper. Bestemmelse av bygningers luftlekkasje. Viftetrykkmetode,» Standard Norge, 2015.
- [37] T.-O. Relander, «474.621 Framgangsmåte ved luftlekkasjemåling av bygninger,» Byggforskserien, 2014.
- [38] QualiSTAT , «QualiSTAT - Building performance consultants,» QualiSTAT , [Internett]. Available: <http://www.qualistat.com/Blower-Door.html>. [Funnet 19 Februar 2018].
- [39] G. T. Tamura og C. Y. Shaw, «Studies on exterior wall airtightness and air infiltration of tall buildings,» *ASHRAE Transactions* 82 , pp. 179-190, 1976.
- [40] Tight Vent Europe, AIVC, «Building airtightness: A critical review of testing, reporting and quality schemes in 10 countries,» Tight Vent Europe, 2012.
- [41] Canadian General Standards Board, «Amendment no.1: Determination of the overall envelope airtightness of buildings by the fan pressurization method using the building's air handling systems,» 1999.
- [42] SystemAir, «DVCcompact,» SystemAir, Oslo, 2018.
- [43] AF Gruppen, «AF Gruppen AS,» 2017. [Internett]. Available: <https://afgruppen.no/prosjekter/bygg/wang-ung/>. [Funnet 04 April 2018].
- [44] Sapa:, «Sapa: buildingsystems,» Sapa:, [Internett]. Available: <https://www.sapabuildingsystem.com/no/no/bygg/Produkter/vinduer/1086-hoyisolert/>. [Funnet 05 05 2018].
- [45] Standard Norge, «NS-EN 12207:2016 Vinduer og dører. Luftgjennomtrengelighet, Klassifisering,» Standard Norge, 2016.
- [46] Standard Norge, «NS-EN 1026:2016 Vinduer og dører, Luftstrøm, Prøvingmetode,» Standard Norge, 2016.
- [47] Standard Norge, «NS-EN 12207:1999 Vinduer og dører, Luftstrøm, Klassifisering,» Standard Norge, 2000.
- [48] E. V. Sørbotten, «Bruk av moderne ventilasjonsaggregat ved måling av luftlekkasje i bygninger,» 2018.

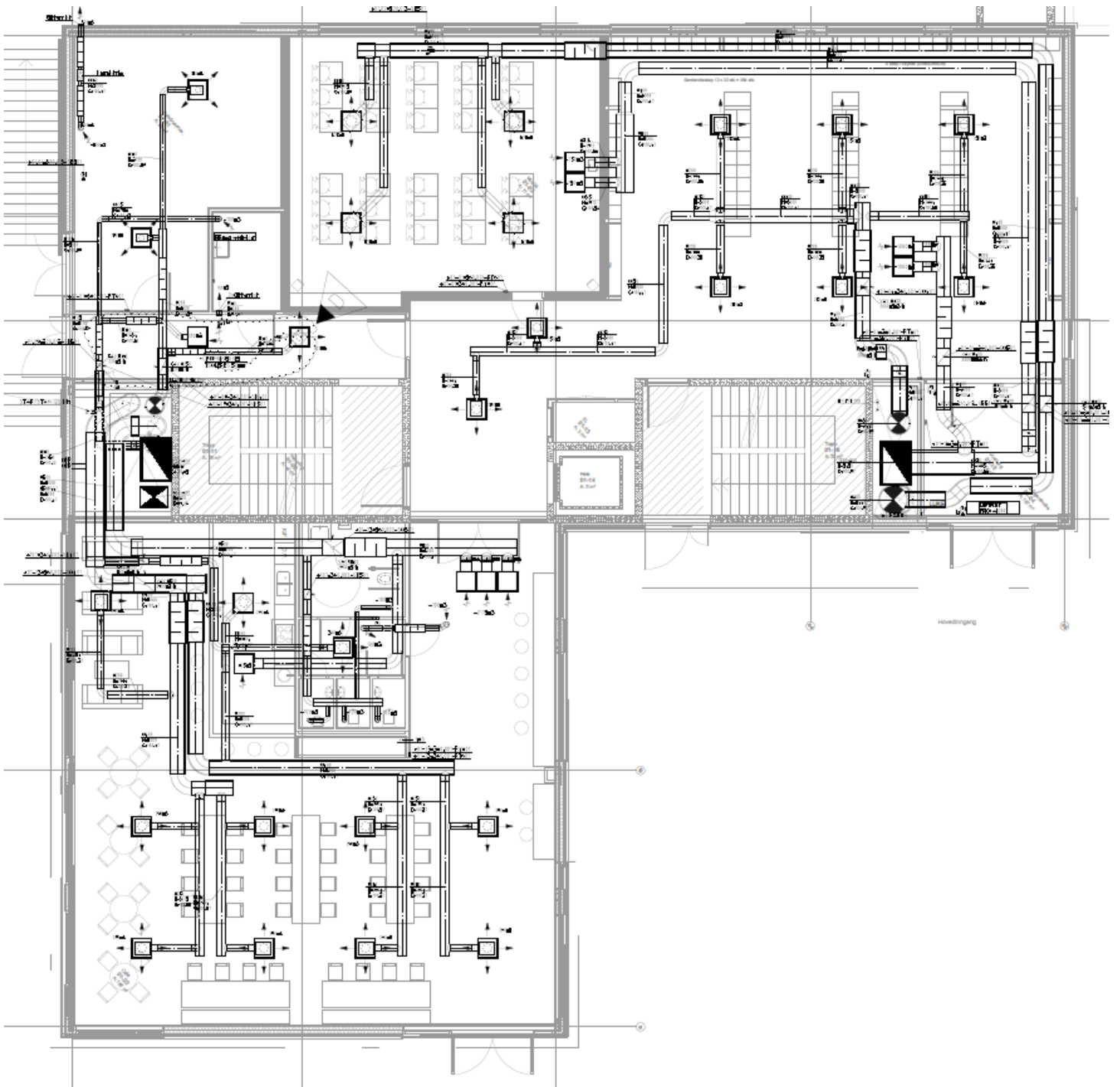
7. Vedlegg

7.1 Plantegninger

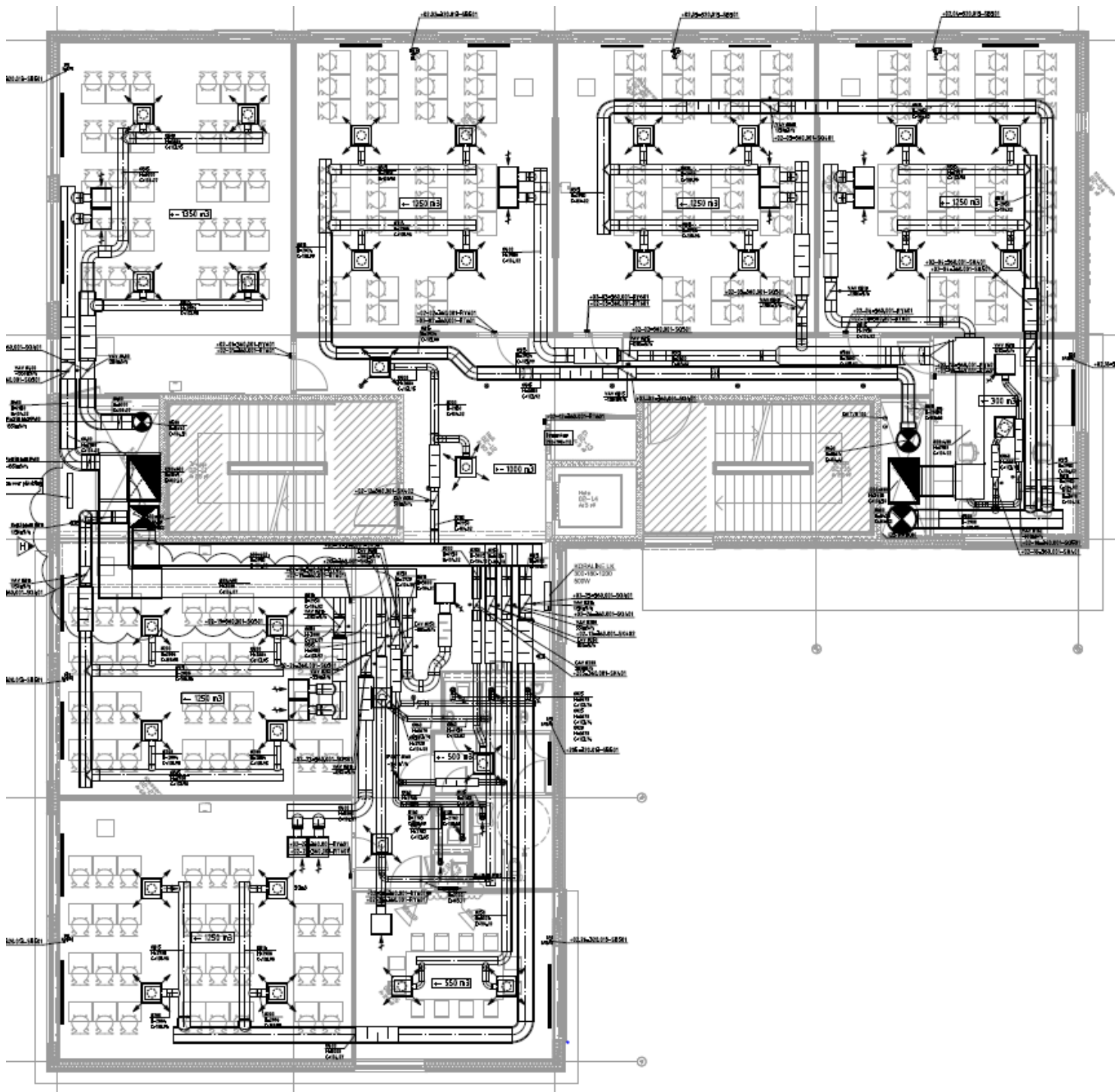
U-etasje



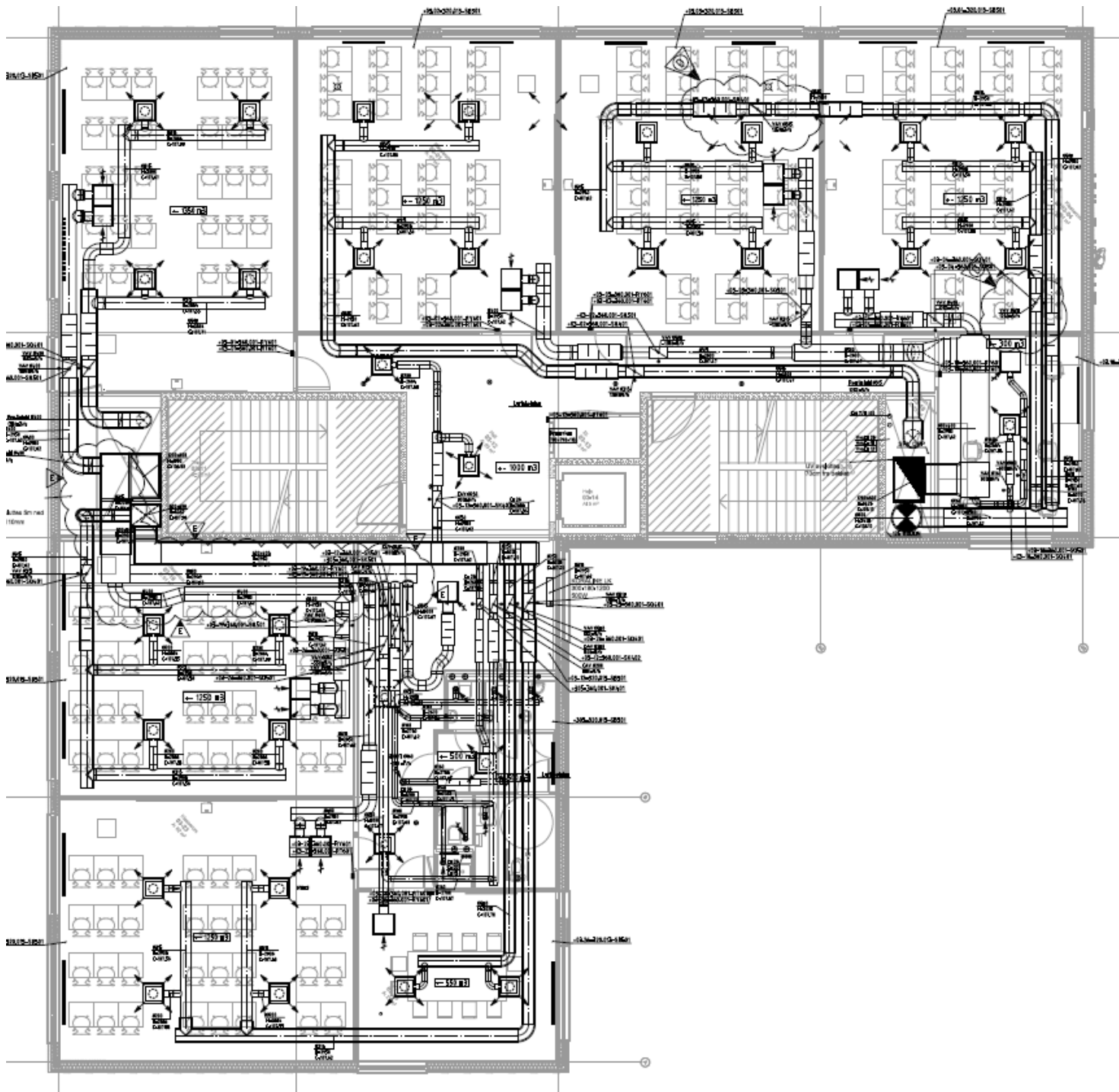
1-etasje



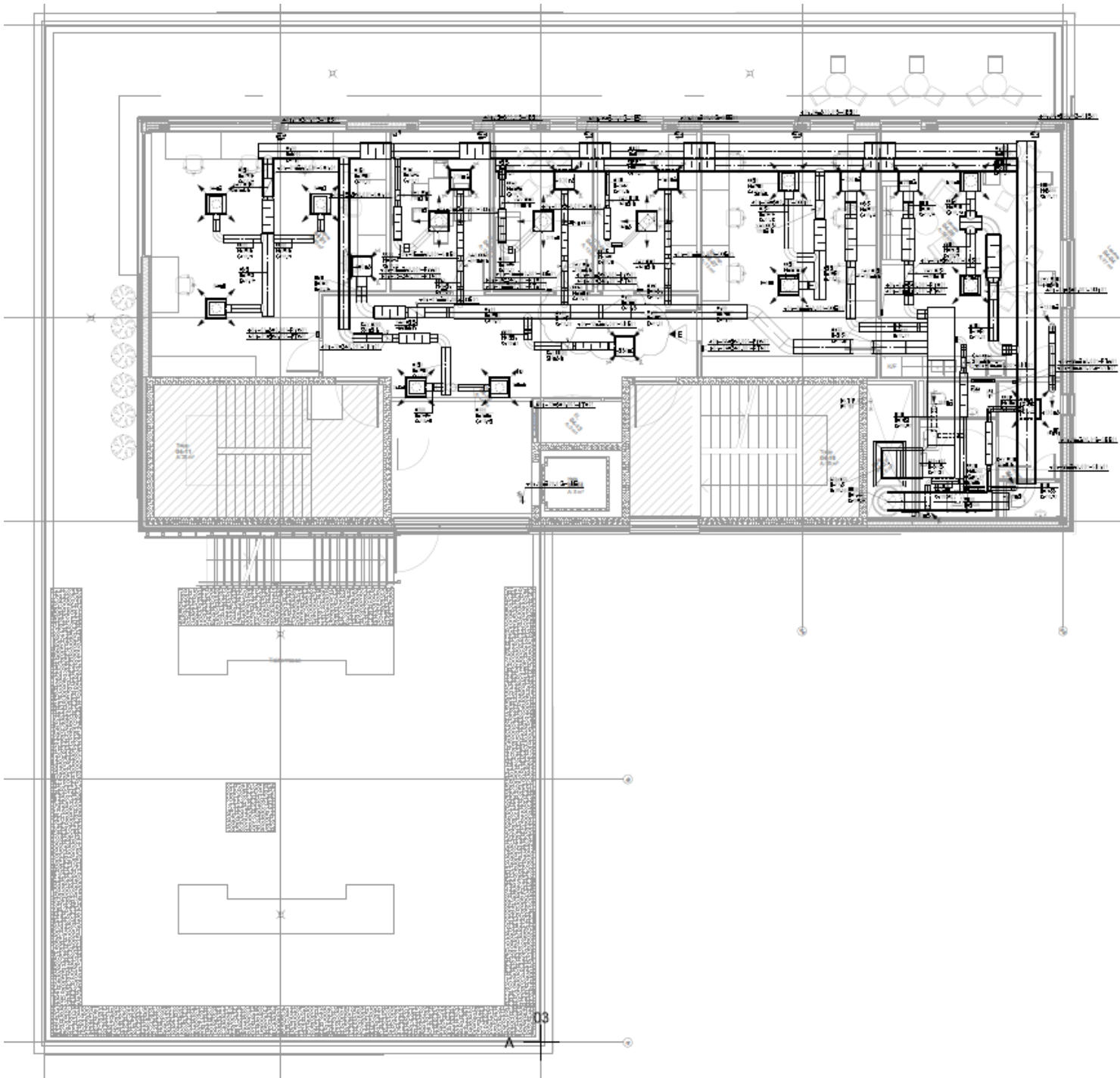
2-etasje



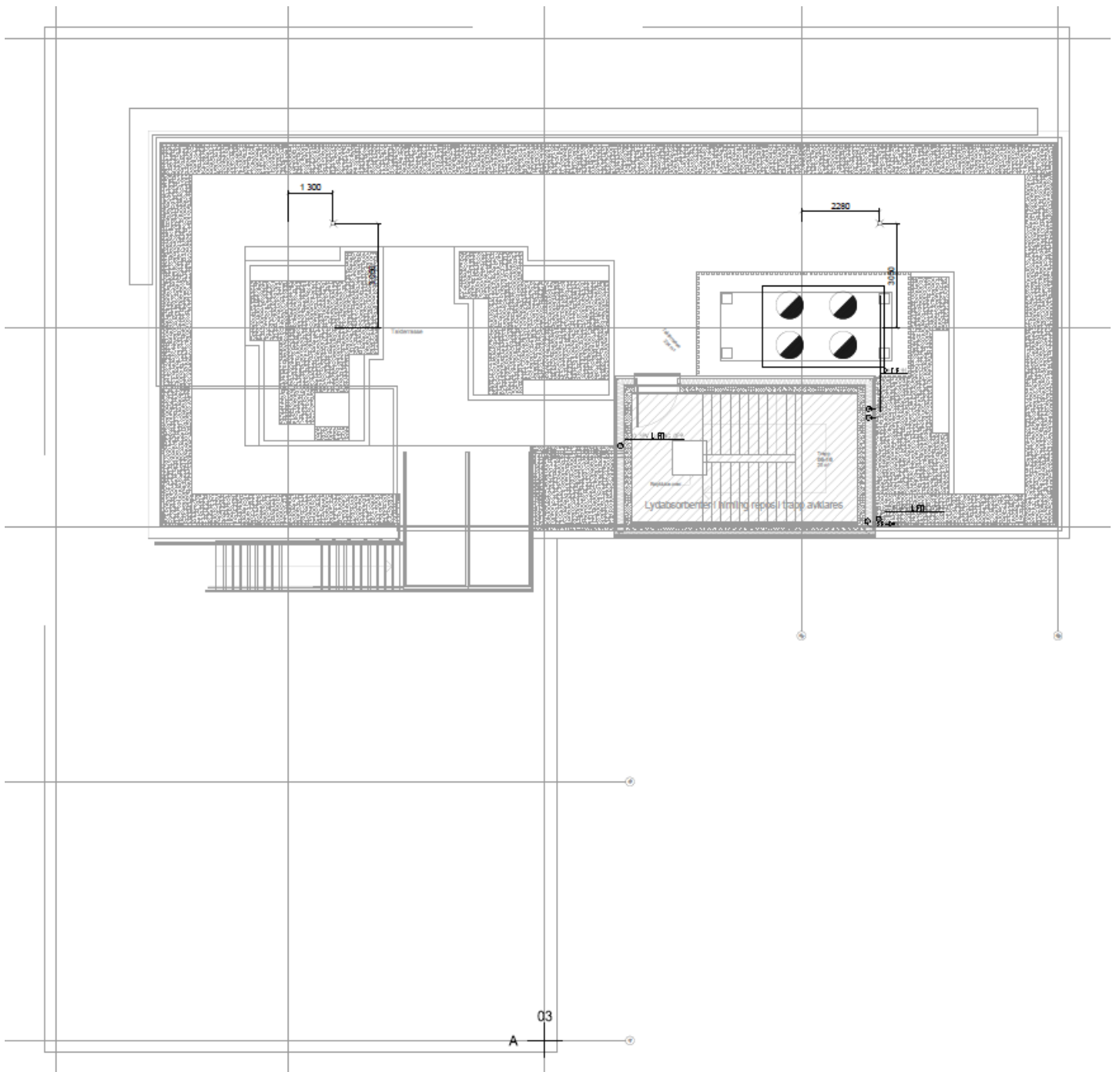
3-etasje



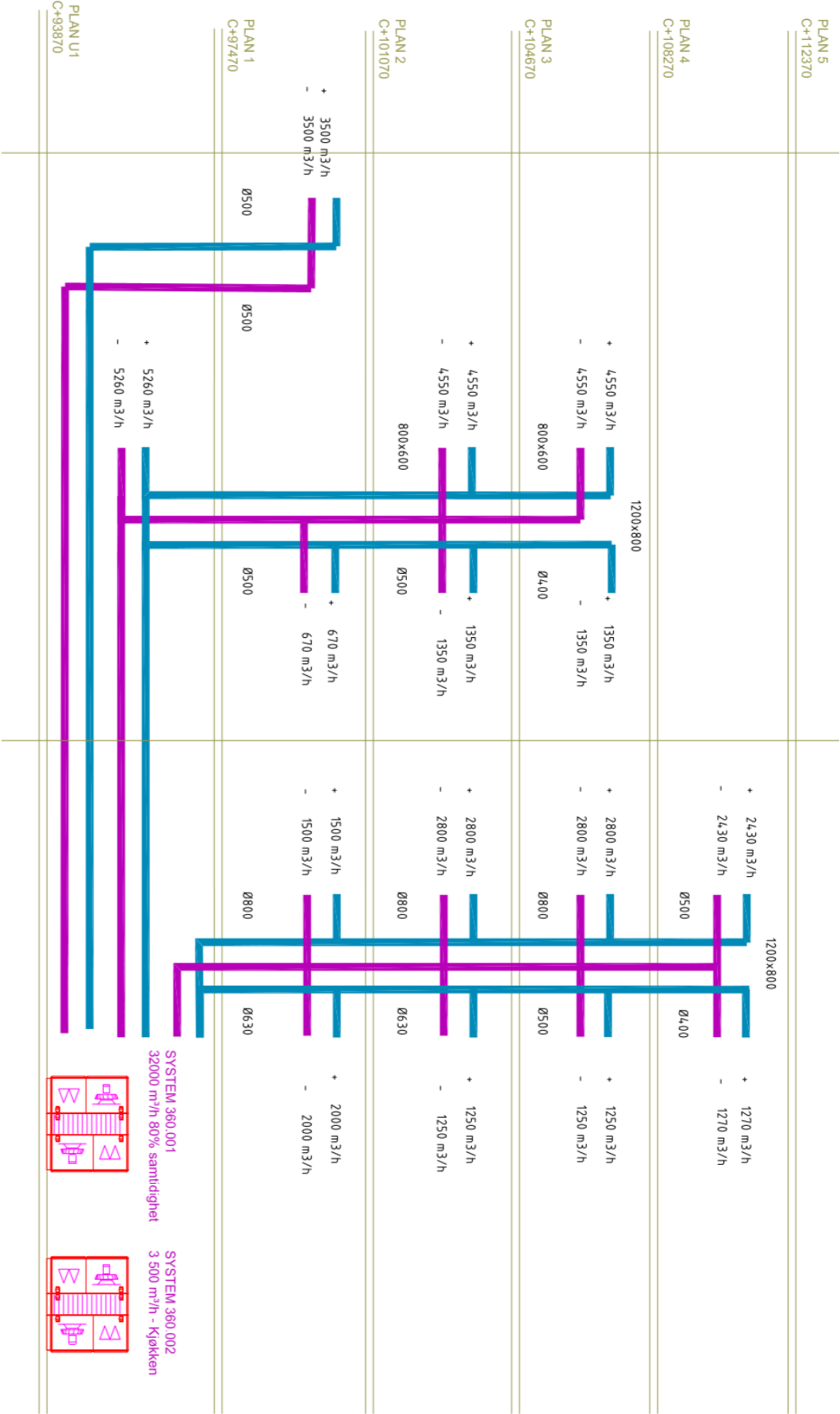
4-etasje



5-etasje



Systemskisse for kanalnett



7.2 Beregning av nødvendig luftmengde før måling

Beregning av nødvendig luftmengde ble gjort etter følgende formler:

$$C = \frac{n_{50}V}{\Delta P^n}$$

$$q = C\Delta P^n$$

Tabellen under viser nødvendig luftmengde ved et lekkasjetall på $0,4 \text{ h}^{-1}$, som er tilsvarende det AF Gruppen fikk ved trykktesting av bygget.

Trykkdifferanse <i>Pa</i>	Lekkasjeeksponent	Lekkasjekoeffisient <i>m³/hPa</i>	Luftmengde <i>m³/h</i>
20	0,67	270,54	2013,37
25	0,67	270,54	2338,04
30	0,67	270,54	2641,83
35	0,67	270,54	2929,26
40	0,67	270,54	3203,42
45	0,67	270,54	3466,45
50	0,67	270,54	3720,00

Nødvendig luftmengde ved lekkasjetall på $0,5 \text{ h}^{-1}$

Trykkdifferanse <i>Pa</i>	Lekkasjeeksponent	Lekkasjekoeffisient <i>m³/hPa</i>	Luftmengde <i>m³/h</i>
20	0,67	338,18	2516,71
25	0,67	338,18	2922,56
30	0,67	338,18	3302,28
35	0,67	338,18	3661,58
40	0,67	338,18	4004,27
45	0,67	338,18	4333,07
50	0,67	338,18	4650,00

Nødvendig luftmengde ved lekkasjetall på $0,6 \text{ h}^{-1}$

Trykkdifferanse <i>Pa</i>	Lekkasjeeksponent	Lekkasjekoeffisient <i>m³/hPa</i>	Luftmengde <i>m³/h</i>
20	0,67	405,81	3020,05
25	0,67	405,81	3507,07
30	0,67	405,81	3962,74
35	0,67	405,81	4393,90
40	0,67	405,81	4805,12
45	0,67	405,81	5199,68
50	0,67	405,81	5580,00

7.3 Målt referansetrykk

	Før måling <i>Pa</i>	Etter måling <i>Pa</i>
1. etg.	1,5	3
4. etg	9 (1,5)	2

7.4 Trykkdifferanse over klimaskjerm

Måling 1

Tidspunkt	Turtall <i>%</i>	Trykkdifferanse over fasade <i>Pa</i>	Korrigert trykkdifferanse <i>Pa</i>
13:14	100	22,5	20,25
13:31	90	16	13,75
13:17	80	17	14,75
13:21	70	13	10,75
13:20	60	11	8,75
13:24	50	5,5	3,25
13:26	40	4	1,75

Måling 2

Tidspunkt	Turtall <i>%</i>	Trykkdifferanse over fasade <i>Pa</i>	Korrigert trykkdifferanse <i>Pa</i>
13:42	100	25	23,25
13:43	90	21	19,25
13:44	80	16,5	14,75
13:45	70	12	10,25
13:46	60	8,8	7,05
13:48	50	6	4,25
13:50	40	5,5	3,75

7.5 Trykkfall i ventilasjonsaggregat og statisk trykk i kanal

Måling 1

Tidspunkt	Trykkfall over roterende varmegjenvinner <i>Pa</i>	Trykkfall over dyseinnløp <i>Pa</i>
13:26	69,7	34
13:24	94,9	47
13:19	121,5	67
13:21	149,4	84
13:17	178,1	107
13:28	204,2	126,5
13:14	238,2	151

Tidspunkt	Statisk trykk i tilluftskanal <i>Pa</i>	Statisk trykk i avtrekkskanal <i>Pa</i>
13.14	281	-0,1

Måling 2

Tidspunkt	Trykkfall over roterende varmegjenvinner <i>Pa</i>	Trykkfall over dyseinnløp <i>Pa</i>
13:49	68,4	34
13:47	93,8	48
13:46	120,6	68
13:45	147,6	88
13:44	176,2	108
13:43	206	129
13:42	235	150

7.6 Luftmengder i ventilasjonsaggregat

Måling 1

Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner	Korrigert luftmengde	Luftmengde gjennom dyseinnløp	Korrigert luftmengde
<i>m³/b</i>	<i>m³/b</i>	<i>m³/b</i>	<i>m³/b</i>
1599,62	1585,23	1011,35	1007,70
2177,96	2159,14	1189,08	1184,89
2788,43	2761,37	1419,71	1414,20
3428,73	3395,46	1589,65	1583,91
4087,40	4046,29	1794,13	1787,30
4686,39	4637,60	1950,78	1943,24
5466,69	5411,71	2131,33	2123,05

Måling 2

Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner	Korrigert luftmengde	Luftmengde gjennom dyseinnløp	Korrigert luftmengde
<i>m³/b</i>	<i>m³/b</i>	<i>m³/b</i>	<i>m³/b</i>
1596,78	1555,11	1011,35	1007,12
2152,71	2129,53	1201,66	1196,25
2767,77	2736,99	1430,27	1423,18
3387,42	3349,75	1627,06	1619,18
4043,79	3997,40	1802,50	1794,02
4727,7	4668,45	1969,96	1961,15
5393,25	5344,75	2124,26	2114,73

7.7 Korrigering av luftmengde gjennom klimaskjerm

Det er benyttet en innetemperatur på 18°C som tilsvarer 291 K og en gjennomsnittlig utetemperatur fra kl.12-13, da målingene pågikk, på 10,33°C som tilsvarer 283,33 K.

Måling 1

Korrigert luftmengde (dyseinnløp)	Korrigert luftmengde (roterende varmegjenvinner)
<i>m³/h</i>	<i>m³/h</i>
1034,96	1628,12
1216,95	2217,57
1452,47	2836,09
1626,77	3487,34
1835,66	4155,77
1995,82	4763,09
2180,50	5558,14

Måling 2

Korrigert luftmengde (dyseinnløp)	Korrigert luftmengde (roterende varmegjenvinner)
<i>m³/h</i>	<i>m³/h</i>
1034,62	1597,19
1228,62	2187,16
1461,69	2811,05
1662,99	3440,39
1842,56	4105,56
2014,22	4794,78
2171,95	5489,37

7.8 Beregning av luftstrømningskoeffisient, C_{env} , og lekkasjeeksponent, n

Lekkasjekoeffisienten, C , og lekkasjeeksponenten beregnes etter vedlegg C i ISO 9972.

De konverterte dataene benyttes for å bestemme strømningskoeffisienten C_{env} , som senere benyttes for å beregne lekkasjekoeffisient, C_L , og strømningseksponenten (lekkasjeeksponenten), n . Dette gjøres ved å bruke "minste kvadratteknikk".

Det lages en logaritmisk transformasjon av variablene q og ΔP for hver avlesning for å bestemme C og n :

$$x_i = \ln(\Delta p_i)$$

$$y = \ln(q_i)$$

for $i = 1 \dots N$, hvor N er antall avlesninger. Ved dette forsøket er $N=7$. Den vanlige formelen for C_{env} kan da transformeres til følgende formel:

$$y = \ln(C) + nx$$

Videre beregnes følgende mengder, gjennomsnitt og empirisk varians:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

$$s_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

$$s_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

$$s_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Empirisk varians er et estimat av den teoretiske variansen, σ^2 , som er et mål på den grunnleggende variasjonen i en statistisk fordeling.

Når gjennomsnitt og empirisk varians er beregnet kan et estimat av n , $\ln(C)$ og C beregnes:

$$n = \frac{s_{xy}}{s_x^2}$$

$$\ln(C) = \bar{y} - n\bar{x}$$

$$C = \exp(\bar{y} - n\bar{x})$$

Beregning for luftmengde gjennom dyseinnløp:

	Måling 1	Måling 2
\bar{x}	2,09	2,26
\bar{y}	7,01	7,01
s_x^2	0,79	0,52
s_y^2	0,07	0,07
s_{xy}	0,23	0,19
n	0,29	0,37
$\ln(C)$	6,39	6,18
C_{env}	597,91	481,10

Beregning for luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:

	Måling 1	Måling 2
\bar{x}	2,09	2,26
\bar{y}	8,09	8,08
s_x^2	0,79	0,52
s_y^2	0,19	0,19
s_{xy}	0,38	0,31
n	0,48	0,6
$\ln(C)$	7,10	6,72
C_{env}	1208,53	828,63

7.9 95% konfidensintervall

Konfidensintervallet beregnes etter vedlegg C i ISO 9972.

Hvis $T(P, N)$ er konfidensgrensen for den tosidige t-testfordelingen (Student's test) for en sannsynlighet P på N -hendelser, er halvparten av konfidensintervallene ved sannsynligheten for $\ln(C)$ og n gitt ved følgende formel:

$$I_{\ln(C)} = s_{\ln(C)} T(P, N - 2)$$

$$I_n = s_n T(P, N - 2)$$

Standardavvik for n er gitt ved følgende formel:

$$s_n = \frac{1}{s_x} \left(\frac{s_y^2 - n s_{xy}}{N - 2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Det antatte standardavviket for $\ln(C)$ er gitt ved følgende formel:

$$s_{\ln(C)} = s_n \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}}$$

	Luftmengde gjennom dyseinnløp		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner	
	Måling 1	Måling 2	Måling 1	Måling 2
s_n	0,03	0,07	0,05	0,05
$s_{\ln(C)}$	0,03	0,06	0,12	0,11

Verdiene for det tosidige konfidensintervallet $T(P, N)$ for en t-testfordeling er gitt i tabell:

N	P					
	0,8	0,9	0,95	0,99	0,995	0,999
1	3,0780	6,3138	12,7060	63,6570	127,3200	636,6190
2	1,8860	2,9200	4,3027	9,9248	14,0890	31,5980
3	1,6380	2,3534	3,1825	5,8409	7,4533	12,9240
4	1,5330	2,1318	2,7764	4,6041	5,5976	8,6100
5	1,4760	2,0150	2,5706	4,0321	4,7733	6,8690
6	1,4400	1,9430	2,4469	3,7074	4,3170	5,9590
7	1,4150	1,8946	2,3646	3,4995	4,0293	5,4080
8	1,3970	1,8595	2,3060	3,3554	3,8325	5,0410
9	1,3830	1,8331	2,2622	3,2498	3,6897	4,7810
10	1,3720	1,8125	2,2281	3,1693	3,5814	4,5787
∞	—	1,6450	1,9600	2,5760	2,8070	3,2910

Målingene er gjort ved 7 punkter og det benyttes et konfidensintervall på 95%. Dette medfører at $N = 7$, $P = 0,95$ og $T = 2,5706$.

Dette betyr at med en sannsynlighet, P, ligger strømmingsekspONENTEN, n, innenfor konfidensintervallet:

$$(n - I_n, n + I_n)$$

Lekkasjekoeffisienten, C, ligger innenfor et konfidensintervall beregnet etter følgende formel:

$$\{C \exp[-I_{\ln(C)}], C \exp[I_{\ln(C)}]\}$$

Beregning for luftmengde gjennom dyseinnløp:

	Måling 1	Måling 2
$I_{\ln(C)}$	0,18	0,15
I_n	0,08	0,08
$(n - I_n, n + I_n)$	(0,21, 0,37)	(0,29, 0,45)
$\{C \exp[-I_{\ln(C)}], C \exp[I_{\ln(C)}]\}$	(499,42, 715,83)	(414,09, 559,0)

Beregning for luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:

	Måling 1	Måling 2
$I_{\ln(C)}$	0,31	0,28
I_n	0,13	0,13
$(n - I_n, n + I_n)$	(0,35, 0,61)	(0,47, 0,73)
$\{Cexp[-I_{\ln(C)}], Cexp[I_{\ln(C)}]\}$	(886,4, 1647,7)	(625,8, 1095,6)

7.10 Beregning av lekkasjeeksponent, C_L

Lekkasjekoeffisienten, C_L , beregnes ved å korrigere luftstrømningskoeffisienten, C_{env} , til standardbetingelser [20°C og $1,013 \cdot 10^5$ Pa] ved å bruke følgende formel:

$$C_L = C_{env} \left(\frac{T_0}{T_{int}} \right)^{1-n}$$

T_0 er absoluttemperatur ved standardforhold [K], 293 K.

T_{int} er innvendig absoluttemperatur [K], 291 K.

	Luftmengde gjennom dyseinnløp:		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:	
	Måling 1	Måling 2	Måling 1	Måling 2
C_L	600,82	483,18	1212,84	830,9

7.11 Beregning av luftmengden, q

Luftlekkasjehastigheten, q, ved referansetrykkdifferansen, ΔP , uttrykt i m³/h beregnes etter følgende formel:

$$q = C_L \Delta P^n$$

	Luftmengde gjennom dyseinnløp		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner	
	Måling 1	Måling 2	Måling 1	Måling 2
q ₅₀	1868,30	2054,60	7930,66	8688,22

7.12 Beregning av nødvendig luftmengde og lekkasjetall ved 50 Pa

For å finne nødvendig luftmengde ved en trykkdifferanse på 50 Pa benyttes følgende formel:

$$q_{50} = C_L (50 Pa)^n$$

Lekkasjetallet, n₅₀, beregnes etter følgende formel:

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V}$$

$$\dot{V}_{50} = q_{50}$$

Bygget har et innvendig volum, V, på 9300 m³.

	Luftmengde gjennom dyseinnløp		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner	
	Måling 1	Måling 2	Måling 1	Måling 2
q ₅₀	1868,30	2054,60	7930,66	8688,22
n ₅₀	0,2	0,22	0,85	0,93

7.13 Korrespondanse med Sapa bygningssystemer

[Redacted]

ma 07.05, 13:58
Marie Smidt; KLR SM Ordre system.no <sapa.no@hydro.com> ▾

Hei,

Takk for mail.

For 10 år siden solgte vi mer av vinduet 1074. Dette er bygd opp på samme måte som 1086, bare dette har en dybde på 74 mm istenfor 86 mm. Det har skjedd mye med varmeisoleringsvevnen til vinduer over de 10 siste årene, men lufttethetsklassen på 1074 har ikke forandret seg. For 10 år siden var lufttethetsklassen til 1074 også klasse 4 men i henhold til en eldre standard, ihh EN 12207:1999.

Lykke til med oppgaven!

Med vennlig hilsen / Best regards

[Redacted]
Siv.ing. / Byggteknisk rådgiver
Hydro Building Systems
Kjeller Vest 6
2007 Kjeller
[Redacted]
[Redacted]
www.sapabuildingsystem.no www.wicona.no

Marie Smidt
lø 05.05, 11:00

Hei,

Jeg er student ved OsloMet-Storbyuniversitet (tidligere Høgskolen i Oslo og Akershus) og holder på å skrive masteroppgave om lufttethetsmålinger av bygg. I den forbindelse har jeg utført trykktesting i et bygg som har benyttet deres vinduer, Sapa Vindu 1086-innadsstående høyisolert. Disse vinduene har lufttethet etter klasse 4 i NS-EN 12207. Det jeg lurer på er om dere har en oversikt over lufttetheten på tilsvarende vinduer fra 10 år siden, slik at det vil være mulig å sammenligne hvordan vinduene har forbedret seg og hvordan det påvirker byggets lufttethet.

Håper på snarlig svar.

Mvh.
Marie Smidt

7.14 Måleprotokoll, WANG Ung

Målerapport

Utført av (firma): OsloMet - storbyuniversitetet

Firmas adresse: Pilestredet 35

Utført av: Marie Smidt, Elina V. Sørbotten, Peter Schild og Dimitrios Kraniotis

Byggets adresse: Haslevangen 12

Leilighetsnummer:

Dato for måling: 27.04.18

Dato for rapport: 22.05.18

Beskrivelse av testzone:

Byggeår: 2018

Høyde: 14,9 m

Areal: 3000 m²

Innvendig volum: 9300 m³

Status for alle åpninger i klimaskjermen; lukket, forseglet, åpen: Lukket

Status for alle åpninger i testsonen; lukket, forseglet, åpen: Forseglet

Detaljert beskrivelse av midlertidige forseglede åpninger: Det var ikke innlagt vann i bygget da målingene ble utført. På grunnlag av dette ble alle toaletter, vasker og sluker forseglet med teip. Spesialventilasjon ble også forseglet med teip. Ventilasjonsaggregatet som ikke ble benyttet under målingene ble stengt med stengespjeld.

Produktdokumentasjon for ventilasjonsaggregat: Se vedlegg 1.

Produktdokumentasjon for roterende gjenvinner: Produktdokumentasjon for roterende varmegjenvinner var ikke tilgjengelig. Leverandør av rotor er Lautner Energiesparteknik GmbH i Tyskland.

Over- og/eller undertrykk: Overtrykk

Måleutstyr: Differansetrykkmålet/digitalt manometer, termoelement, plastslanger, T-stykker, tynne kapillærrør, teip og verneutstyr.

Måleforhold:

Inne- og utetemperatur [°C]: 18 og 10,5

Vindhastighet [m/s] og vindretning:

Vær; opphold, regn, sol: Opphold, delvis skyet

Resultat:

Referansetrykk før målinger [Pa]: 1,5 Pa i både 1. og 4. etasje

Referansetrykk etter målinger [Pa]: 3 Pa i 1. etasje og 2 Pa i 4. etasje

Gjennomsnittlig referansetrykk [Pa]: 2,25 Pa i 1. etasje og 1,75 i 4. etasje

Lister over målte trykkdifferanser [Pa] med tilhørende lufthastighet [m³/h]:

Måling 1:

Luftmengde gjennom dyseinnløp:

Korrigert luftmengde	Korrigert trykkdifferanse
<i>m³/h</i>	<i>Pa</i>
727,13	1,75
854,99	3,25
1020,45	8,75
1142,91	10,75
1289,69	14,75
1402,19	13,75
1531,94	20,25

Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:

Korrigert luftmengde	Korrigert trykkdifferanse
<i>m³/h</i>	<i>Pa</i>
1628,12	1,75
2217,57	3,25
2836,09	8,75
3487,34	10,75
4155,77	14,75
4763,09	13,75
5558,14	20,25

Måling 2:

Luftmengde gjennom dyseinnløp:

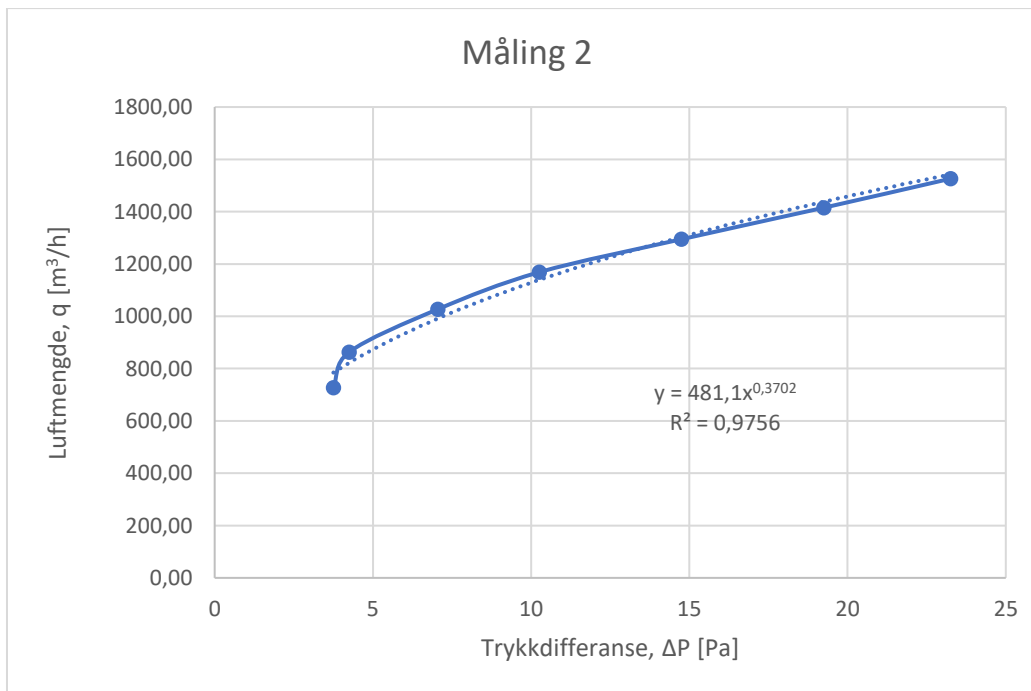
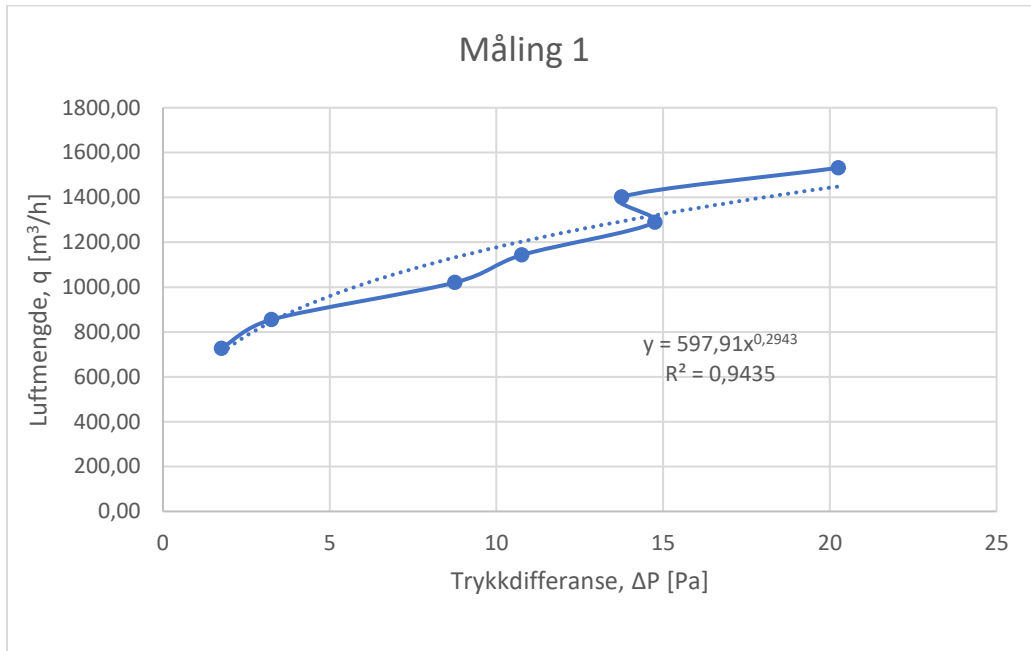
Korrigert luftmengde	Korrigert trykkdifferanse
<i>m³/h</i>	<i>Pa</i>
726,72	3,75
863,18	4,25
1026,94	7,05
1168,36	10,25
1294,52	14,75
1415,11	19,25
1525,93	23,25

Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:

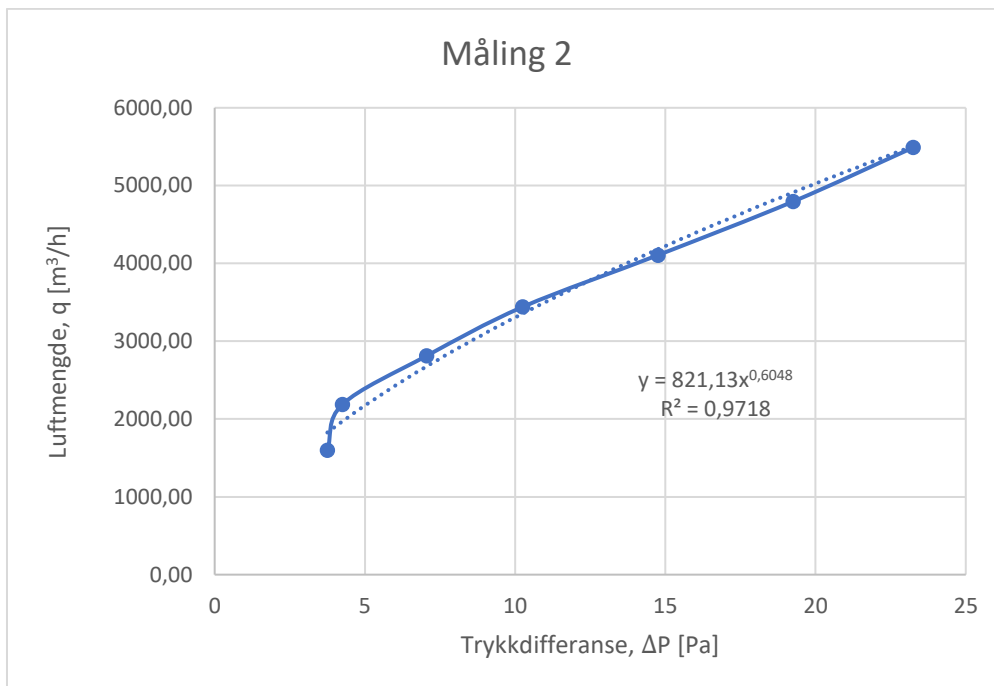
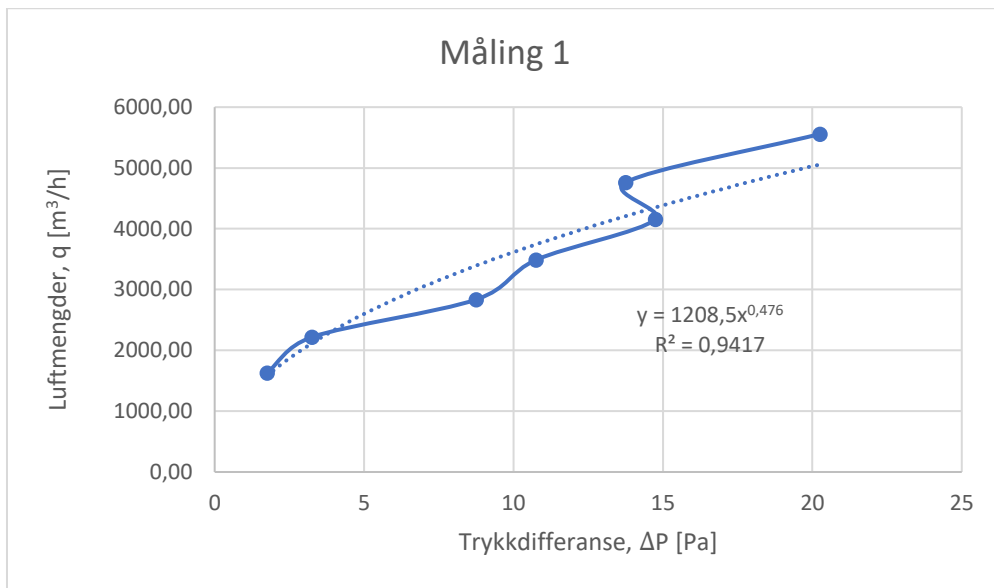
Korrigert luftmengde	Korrigert trykkdifferanse
<i>m³/h</i>	<i>Pa</i>
1597,19	3,75
2187,16	4,25
2811,05	7,05
3440,39	10,25
4105,56	14,75
4794,78	19,25
5489,37	23,25

Luftlekkasjegrav for q og ΔP :

Luftmengde gjennom dyseinnløp:



Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:



Lekkasjeeksponent, n , og lekkasjekoeffisient, C :

	Luftmengde gjennom dyseinnløp:		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:	
	<i>Måling 1</i>	<i>Måling 2</i>	<i>Måling 1</i>	<i>Måling 2</i>
C [m ³ /hPa]	597,91	481,1	1208,5	821,13
n [-]	0,29	0,37	0,48	0,6

Nødvendig luftmengde, q_{50} , og lekkasjetall, n_{50} :

	Luftmengde gjennom dyseinnløp:		Luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner:	
	<i>Måling 1</i>	<i>Måling 2</i>	<i>Måling 1</i>	<i>Måling 2</i>
q_{50} [m ³ /h]	1890,79	2047,36	7902,28	8586,06
n_{50} [h ⁻¹]	0,20	0,22	0,85	0,92

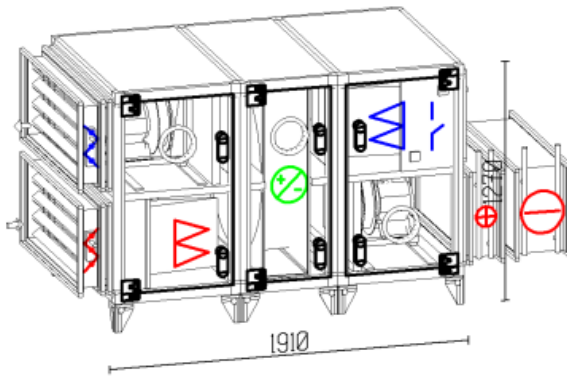
Vedlegg 1

Produktutvalgsprogram | SystemairCAD Versjon C2017-02.09.G1 | 08.06.2017

Oversikt for aggregat nr: 2

DVCompact 15

Tilbudsnummer 16025838
 Prosjekt Wang Skole
 Anlegg 36.02 /



DVCompact luftbehandlingsaggregat med fullintegrert automatikk ferdig kablet fra fabrikk

Luft-/viftedata	Tilluft	Fraluft	
Luftmengde (1,205 kg/m ³)	3000	3000	m ³ /h
Lufthastighet i aggregat	1.68	1.68	m/s
Eksternt trykktap	250	250	Pa
Viftehastighet	2061	1967	o/min
Motor	1.30	1.30	kW
Spenning	3x400	3x400	V
Strøm, Amp., merket	2.9	2.9	A



Aggregatdata

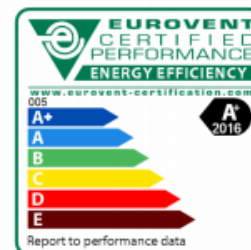
Aggregatbredde	1120 mm
Vekt	500 kg
Ecodesign	2016 - Godkjent 2018 - Godkjent
Filter	Tilluft F7 - Fraluft, avtrekk F7
Temperaturvirkningsgrad (våt/tørr)	83.5 % / 83.5 %
SFPv, ved rent filter inklusiv frekvensomformer	1.65 kW/(m ³ /s) (Gjennomsnitt 1.65 kW/(m ³ /s))
SFPe, dimensjonerende filtertrykkfall inkl. frekvensomf.	1.83 kW/(m ³ /s) (Gjennomsnitt 1.83 kW/(m ³ /s))
SFPv, ved rent filter eksklusiv frekvensomformer	1.60 kW/(m ³ /s) (Gjennomsnitt 1.60 kW/(m ³ /s))
SFPe, dimensjonerende filtertrykkfall, ekskl. frekvensomf.	1.77 kW/(m ³ /s) (Gjennomsnitt 1.77 kW/(m ³ /s))
Varmebatteri	Luft 6.0 kW - 15.2/21.0°C
	Vann 80/60°C - 1.4 kPa - 0.07 l/s - 22.0mm / 22.0mm Rørtilkobling
Kjølebatteri	Luft 10.4 kW - 26.0/16.0°C
	Vann 7/12°C - 8.2 kPa - 0.50 l/s - 33.2mm / 33.2mm Rørtilkobling

Lydeffektnivå	Tilluft, innblåsning	Uteluft, inntak	Fraluft, avkast	Fraluft, avtrekk	Lyd, omgivelser
Total	74 dB(A)	64 dB(A)	80 dB(A)	64 dB(A)	48 dB(A)

Arbeidspunkt 2

DVCompact luftbehandlingsaggregat med fullintegrert automatikk ferdig kablet fra fabrikk

Luft-/viftedata	Tilluft	Fraluft	
Luftmengde (1,205 kg/m ³)	2400	2400	m ³ /h
Lufthastighet i aggregat	1.34	1.34	m/s
Eksternt trykktap	160	160	Pa
Viftehastighet	1736	1659	o/min
Motor	1.30	1.30	kW
Spenning	3x400	3x400	V
Strøm, Amp., merket	2.9	2.9	A



Aggregatdata

Aggregatbredde	1120 mm		
Vekt	500 kg		
Ecodesign	2016 - Godkjent 2018 - Godkjent		
Filter	Tilluft F7 - Fraluft, avtrekk F7		
Temperaturvirkningsgrad (våt/tørr)	85.1 % / 85.1 %		
SFPv, ved rent filter inklusiv frekvensomformer	1.23 kW/(m ³ /s) (Gjennomsnitt 1.65 kW/(m ³ /s))		
SFPe, dimensjonerende filtertrykkfall inkl. frekvensomf.	1.42 kW/(m ³ /s) (Gjennomsnitt 1.83 kW/(m ³ /s))		
SFPv, ved rent filter eksklusiv frekvensomformer	1.19 kW/(m ³ /s) (Gjennomsnitt 1.60 kW/(m ³ /s))		
SFPe, dimensjonerende filtertrykkfall, ekskl. frekvensomf.	1.37 kW/(m ³ /s) (Gjennomsnitt 1.77 kW/(m ³ /s))		
Varmebatteri	Luft	4.3 kW - 15.8/21.0°C	
	Vann	80/60°C - 0.8 kPa - 0.05 l/s - 22.0mm / 22.0mm Rørtilkobling	
Kjølebatteri	Luft	8.1 kW - 26.0/16.0°C	
	Vann	7/12°C - 5.3 kPa - 0.38 l/s - 33.2mm / 33.2mm Rørtilkobling	

Lydeffektnivå	Tilluft, innblåsning	Uteluft, inntak	Fraluft, avkast	Fraluft, avtrekk	Lyd, omgivelser
Total	70 dB(A)	61 dB(A)	77 dB(A)	60 dB(A)	47 dB(A)

Ecodesign

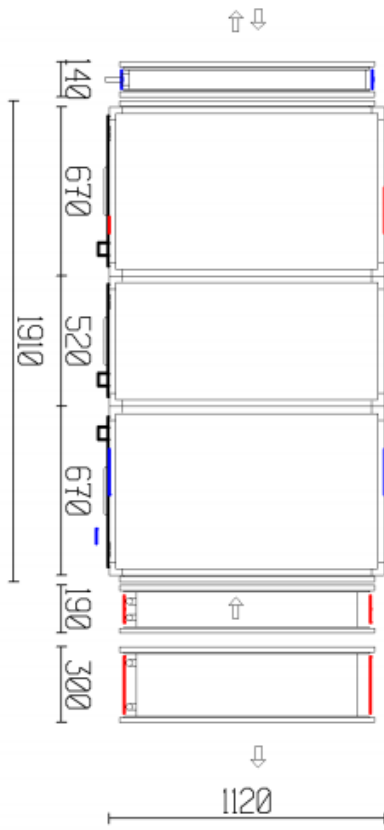
	2016	Verdi	Eco grense	2018	Verdi	Eco grense
Aggregattype (ikke-bolig, dobbelrettet)	Godkjent			Godkjent		
Vifte med turtalsregulering	Godkjent			Godkjent		
Varmegjenvinning	Godkjent			Godkjent		
Termisk effektivitet for gjenvinning	Godkjent	83.5	67.0	Godkjent	83.5	73.0
Trykkmåling (gjelder kun 2018)	Godkjent			Godkjent		
SFP internt i W(m ² /s)	Godkjent	677	1570	Godkjent	677	1290
Totalt resultat	Godkjent			Godkjent		

		Tilluft	Avtrekk	
Fabrikant	Systemair			
Modell	DVCompact 15			
Type av refrigerant	NRVU;BVU			
Motortype		Variable	Variable	Installert
Gjenvinningstype	Roterende varmeveksler			
Termisk effektivitet for gjenvinning (tørr)	83.5			%
Ikke boligaggregat - luftmengde		0.83	0.83	m ² /s
Effekt ved rene filtre og hastighetsregulering		0.74	0.62	kW
SFP internt i W(m ² /s) 2016	677	347	331	W/(m ² /s)
SFP internt i W(m ² /s) 2018	677	347	331	W/(m ² /s)
Fronthastighet		1.68	1.68	m/s
Nominelt eksternt trykk		250.00	250.00	Pa
Internt trykktap i komponentene		214.69	203.42	Pa
Samlet statisk trykk ved rene filtre		549.77	460.22	Pa
Vifteeffekt ved rene filtre		61.96	61.38	%
Maksimal eksternt lekkasje	Lekkaseklasse L2 i henhold til EN 1886. Lekkasje er under 1%			
Maksimal intern lekkasje	Lekkasje er mindre enn 3 %.			
Energiklasse for filtre		B	B	
Beskrivelse av synlig filteralarm	Kontrollpanel			

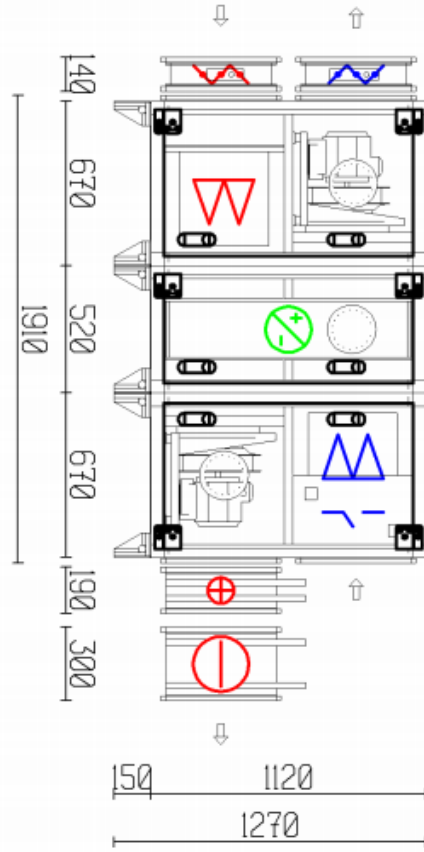
Lydeffektnivå	Tilluft, innblåsning	Uteluft, inntak	Fraluft, avkast	Fraluft, avtrekk	Lyd, omgivelser
Total	74 dB(A)	64 dB(A)	80 dB(A)	64 dB(A)	48 dB(A)

Ecodesign er beregnet for et referanseaggregat med F7 filter i tilluft og M5 filter i avtrekk.

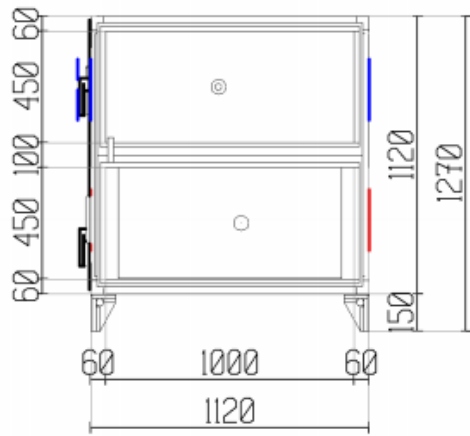
Plantegning



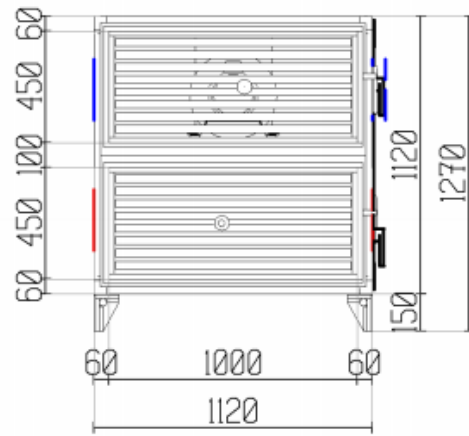
Inspeksjonsside



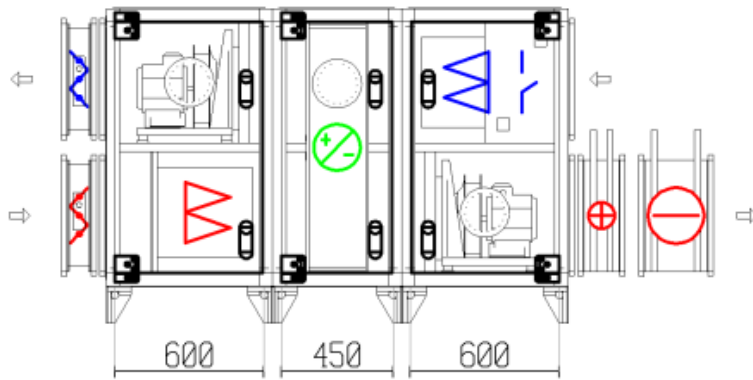
Høyre gavl



Venstre gavl



Mål på dører og paneler



Teknisk spesifikasjon

Aggregat

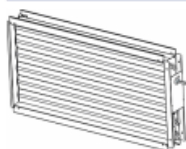
Frekvensbånd [Hz]	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	Total
Lydeffektnivå	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB(A)]
Tilluft, innblåsning	65	67	70	71	70	67	62	57	74
Uteluft, inntak	65	65	67	66	52	47	29	23	64
Fraluft, avkast	65	67	72	73	74	74	72	71	80
Fraluft, avtrekk	63	64	66	65	50	45	28	22	64
Lyd, omgivelser	60	57	53	43	39	36	36	21	48

Automatikk

Språk i meny	Norsk
Ekstern kommunikasjon	Modbus/Exoline via RS485, Exoline/WEB via TCP/IP, BACnet via IP
Viftestyring	VAV
Spjeldmotor, inntak	Motor fjærretur
Spjeldmotor, avkast	Motor fjærretur
Frostbeskyttelse, varmebatteri	Utvendig anleggspøler
Batterikonfigurasjon	Varme og kjøling
Røykdetektor	1 røykdetektor i tilluftskanal
Hovedtilførsel til automatikken	
Tavledata	Spenning 3x400V + N + PE 50 Hz
	Maks. ik 16 kA
	Min. ik 650 A
	Maks. sikring 25 A
	Min. sikring 10 A

Tilluftsassagregat består av

Spjeld



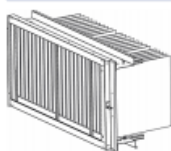
Trykkfall	5	Pa
Spjeldblad	Standard	

Inspeksjonsdel



Trykkfall	2	Pa
Lengde	150	mm

Filter



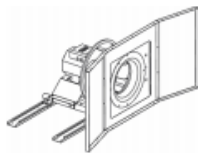
Dimensjonerende trykkfall	118	Pa
Start trykkfall/Slutt trykkfall	59/177	Pa
Lufthastighet, frontareal	2.17	m/s
Lufthastighet, filterareal	0.10	m/s
Filterklasse	F7	
Filterstørrelse	2x[490x392]	
Filterlengde	520	mm





Roterende varmeveksler

	Tilluft	Avtrekk	
Luftmengde	3000	3000	m³/h
Trykkfall	156	156	Pa
Lufttemperatur, før/etter	-20.0/15.2	22.0/-13.2	°C
Relativ luftfuktighet, før/etter	90/37	30/99	%
Effekt	44.00		kW
Temperaturvirkningsgrad	83.5		%
Tørr effektivitet - i følge EN 308 ved 3000 m³/h	83.5		%
Fuktvirkningsgrad	76.4		%
Varmegjenvinner type	ST - Kondensation (temperatur)		
Temperaturvirkningsgrad		Høyeffekt	
Rotor diameter	Ø970		
Drivsystem for rotor	Variabel drift		
Elektriske data	1x230V, 40W, 0.7Amp		
Inspeksjonsvindu		1	Stk
Renblåsningssektor		1	Stk



Vifte, Kammer

Luftmengde	3000	m³/h
Ekstern trykktap	250	Pa
Trykkfall	16	Pa
Statisk trykk	625	Pa
Totaltrykk	654	Pa
Akseleffekt	0.70	kW
Viftehastighet	2061	o/min
Max viftehastighet	2575	o/min
Virkningsgrad ved statisk trykk	74.6	%
Virkningsgrad ved totaltrykk	78.0	%
K-faktor	121	
Viftetype	RH35Cpro	
Direkte drift		

Motor

Motortype	IE4, PM-Motor	
Motor type-Normstr.	HPS 71	
Termosikring	Termistor	
Merkeeffekt	1.30	kW
Omdreining, merket	2500	o/min
Omdreining, maksimum	2750	o/min
Strøm, Amp., merket	2.9	A
Virkningsgrad	90.1	%
Virkningsgrad i arbeidspunktet	89.0	%

Frekvensomformer

Spenning	3x400	V
Driftsfrekvens	103	Hz
Max. Driftsfrekvens	128	Hz
Frekvensomformer kablet fra fabrikk. (3.7 Amp)	1	Stk
Effektforbruk fra hovedtilførsel, ekskl frekvensomformer	0.78	kW
Effektforbruk fra hovedtilførsel, inkl frekvensomformer	0.81	kW

Frekvensomformer IP 20 er montert ved siden av viften inne i viftdelen til aggregatet. Det er benyttet skjermet kabel mellom frekvensomformer og viftemotor. Alle nødvendige parametre er lagt inn på omformer, tilpasset til

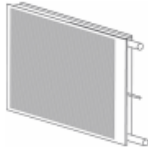


motor og viftehjulets karakteristikk.

Forsyningen til aggregatet skal ha jordfeilbryter ikke mindre enn 100 mA, og beregnet for frekvensomformere.

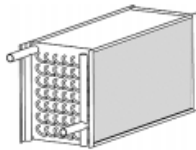
Inspeksjonsvindu	1	Stk
Led-lys	1	Stk

Varmebatteri MAX, Væske



Luftmengde	3000	m³/h
Trykkfall	11	Pa
Lufttemperatur, inn/ut	15.2/21.0	°C
Relativ luftfuktighet, før/etter	37/25	%
Effekt	5.95	kW
Lufthastighet	1.85	m/s
Væskemedie	Vann	
Væsketemperatur inn/ut	80.0/60.0	°C
Væskemengde	0.07	l/s
Væske trykktap	1.4	kPa
Væskehastighet	0.25	m/s
Batterivolum	1.3	l
Anslutningsside	Service side	
Tilkoblingsmål inn/ut	22.0mm / 22.0mm	
Rørmateriale	Cu	
Lamellmateriale	Al	
Lamellavstand	2.1	mm
Rørrader	1	
Overflate areal	8.6	m²
Vekt, batteri	6.0	kg
Batteri type	M 25x22-3/8 CS 18 T 1 R 1000 A 2.1 P 4 NC	

Kjølebatteri MAX, Væske



Luftmengde	3000	m³/h
Trykkfall, vått batteri	67	Pa
Trykktap, tørt batteri	56	Pa
Lufttemperatur, inn/ut	26.0/16.0	°C
Relativ luftfuktighet inn/ut	50/78	%
Kjøleeffekt	10.41	kW
Sensibel kjøling	96	%
Lufthastighet	1.85	m/s
Kondensmengde	0.2	l/min
Væskemedie	Vann	
Væsketemperatur inn/ut	7.0/12.0	°C
Væskemengde	0.50	l/s
Væske trykktap	8.2	kPa
Væskehastighet	0.57	m/s
Batterivolum	5.2	l
Anslutningsside	Service side	
Tilkoblingsmål inn/ut	33.2mm / 33.2mm	
Rørmateriale	Cu	
Lamellmateriale	Al	
Lamellavstand	2.1	mm
Rørrader	4	
Overflate areal	34.4	m²
Vekt, batteri	18.1	kg
Kondensarmateriale	Standard	



Batteri type

M 25x22-3/8 CS 18 T 4 R 1000 A 2.1 P 12 NC

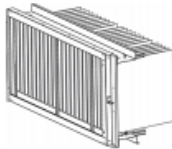
Fraluftsaggregat består av

Inspeksjonsdel



Trykkfall	2	Pa
Lengde	150	mm

Filter

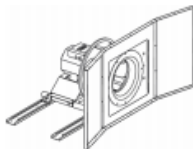


Dimensjonerende trykkfall	118	Pa
Start trykkfall/Slutt trykkfall	59/177	Pa
Lufthastighet, frontareal	2.17	m/s
Lufthastighet, filterareal	0.10	m/s
Filterklasse	F7	
Filterstørrelse	2x[490x392]	
Filterlengde	520	mm

Roterende varmeveksler

Data vises på tilluft

Vifte, Kammer



Luftmengde	3000	m³/h
Eksternt trykktap	250	Pa
Trykkfall	16	Pa
Statisk trykk	547	Pa
Totaltrykk	575	Pa
Akseleffekt	0.61	kW
Viftehastighet	1967	o/min
Max viftehastighet	2575	o/min
Virkningsgrad ved statisk trykk	74.8	%
Virkningsgrad ved totaltrykk	78.7	%
K-faktor	121	
Viftetype	RH35Cpro	
Direkte drift		

Motor

Motortype	IE4, PM-Motor	
Motor type-Normstr.	HPS 71	
Termosikring	Termistor	
Merkeeffekt	1.30	kW
Omdreining, merket	2500	o/min
Omdreining, maksimum	2750	o/min
Strøm, Amp., merket	2.9	A
Virkningsgrad	90.1	%
Virkningsgrad i arbeidspunktet	88.8	%

Frekvensomformer

Spenning	3x400	V
Driftsfrekvens	98	Hz
Max. Driftsfrekvens	128	Hz

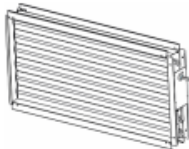
Frekvensomformer kablet fra fabrikk. (3.7 Amp)	1	Stk
Effektforbruk fra hovedtilførsel, ekskl frekvensomformer	0.69	kW
Effektforbruk fra hovedtilførsel, inkl frekvensomformer	0.71	kW

Frekvensomformer IP 20 er montert ved siden av viften inne i viftedelen til aggregatet. Det er benyttet skjermet kabel mellom frekvensomformer og viftemotor. Alle nødvendige parametre er lagt inn på omformer, tilpasset til motor og viftehulets karakteristikk.

Forsyningen til aggregatet skal ha jordfeilbryter ikke mindre enn 100 mA, og beregnet for frekvensomformere.

Inspeksjonsvindu	1	Stk
Led-lys	1	Stk

Spjeld



Trykkfall	5	Pa
Spjeldblad	Standard	

Andre komponenter

Seksjoner

Produkt	Dimensjoner (Bredde x høyde x lengde)	Vekt
CS-15-0-670-1-2	1120 x 1120 x 670 mm	
CS-15-0-520-1-2	1120 x 1120 x 520 mm	
CS-15-0-670-1-2	1120 x 1120 x 670 mm	

Føtter

Produkt	Dimensjoner (Bredde x høyde x lengde)	Vekt
DVZ-15-1	1120 x 150 x 670 mm	
DVZ-15-1	1120 x 150 x 520 mm	
DVZ-15-1	1120 x 150 x 670 mm	

Føtter leveres ferdig påmontert aggregatdelene

Fast forbindelse, 20mm LS profil

Produkt	Dimensjoner (bredde x høyde)	
Friskluft	1000x450 mm	
Tilluft	1000x450 mm	
Avtrekk	1000x450 mm	
Avkast	1000x450 mm	

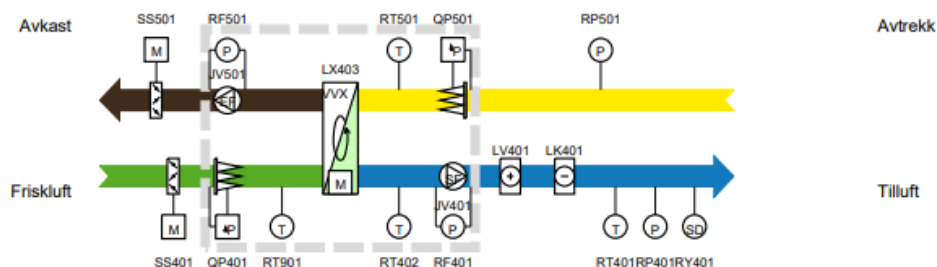
Produktkode	Beskrivelse	Antall
29992	DVCompact-15-R-1,3-400-m/aut	1
16565	Spjeld DVC-15 kl.3	2
16584	Varmebatteri DVH-15-1R-4NC	1
16604	Kjølebatteri DVK-15-4R-12NC	1
16395	Modbus/Exoline via RS485, Exoline/WEB via TCP/IP, BACnet via IP	
16396	VAV	1
69015	Spjeldmotor, inntak, Motor fjærretur NF24A	1
69015	Spjeldmotor fraluft, Motor fjærretur NF24A	1
7899	TG-AH1/PT1000 Utvendig anleggsføler	1
15043	1 røykdetektor i tilluftskanal	1
76784	Led-lys	1

Integrert kontrollsystem Systemair E56

DVCompact luftbehandlingsaggregat er bygget med et komplett og fullintegrert kontrollsystem - basert på Systemair E56 regulator. Alle kablene mellom el-tavle og komponentene i DVCompact luftbehandlingsaggregatet er installert.

Aggregatet er prøvekjørt i fabrikk og har bestått en slutttest uten feil og fabrikkinnstillinger er lagret i regulatoren. Aggregatet leveres delt i tre separate deler for enkel transport. Etter at aggregatet er sammenmontert på byggeplass, må kabelskjøtene mellom aggregatdelene settes sammen.

Flytskjema



JV501	Avtrekksvifte	QP401	Trykkvakt, tilluftsfilter	RP401	VAV trykk giver tilluft
JV401	Tilluftsvifte	QP501	Trykkvakt, avtrekksfilter	RP501	VAV trykk giver avtrekk
RT401	Temperaturføler, tilluft	SS401	Spjeld, inntak	RY401	Røykdetektor
RT501	Temperaturføler, avtrekk	SS501	Spjeld, avkast	RT901	Temperaturføler, uteluft
RT901	Temperaturføler, inntak/uteluft	LX403	Varmegjenvinner	RT402	Temperaturvirkningsgrad
RF401	Trykk giver, tilluftsvifte	LV401	Elektrisk varmebatteri		
RF501	Trykk giver, avtrekksvifte	LV401	Vannvarmebatteri		
		LK401	Kjølebatteri		

El-tavle og tilførsel

El-tavle med rekkeklemmer, releer, sikringer, 24V AC transformator og regulator er integrert i aggregatet foran avtrekksfilter. Strømtilførsel skal kobles til hovedbryter på toppen eller fronten av aggregatet. Elbatteri og DXMatic kjøledel skal ha egen strømtilførsel.

Regulator og håndterminal

Regulatoren er montert i el-tavlen. Programmering og normal betjening utføres vha separat kabeltilkoblet håndterminal med knapper og display av typen - Systemair Control Panel - SCP. Den medfølgende kabelen til håndterminalen er 10m lang og håndterminalen har kapslingsklasse IP 44.

Oppstart

Oppstartsprosedyren er beskrevet i installasjons- og igangkjørings- veiledningene. Fabrikkinnstillinger vises i displayet og disse kan justeres med knappene på håndterminalen.

Tidsinnstillinger

Regulatoren har individuelle innstillinger for start, stopp og luftmengder for hver dag og i tillegg for helligdager. Regulatoren har automatisk veksling mellom sommer- og vintertid.

Temperaturregulering

Temperaturregulering er basert på avlesning fra to temperaturfølere:

- En føler i avtrekksdelen gir en gjennomsnittstemperatur fra alle rommene.
- En føler installert i tilluftskanalen.
- Tilluftregulering har blitt valgt som standard reguleringsform fra fabrikk. Settpunkter for både tilluftregulering og avtrekksregulering kan velges i håndterminalen. Varmegjenvinner, varmebatteri og kjølebatteri reguleres i sekvens av en PI-regulator. Roterende gjenvinner reguleres trinnløst av en innebygget frekvensstyring.

Trykkregulering (VAV)

Luftmengden reguleres separat for tilluft og avtrekk. Settpunktene for ønsket trykk stilles inn separat på håndterminalen. Det faktiske totale trykket blir målt av trykkgivere montert i tilluft- og avtrekkskanalene. Disse verdiene blir sammenlignet med settpunktene og hastigheten på begge viftene justeres samtidig med separate frekvensformere.

Adgangsrettigheter - passord

Det er tre forskjellige adgangsnivåer.

- Grunnivå (ikke passord) - kun lesetilgang til alle innstillinger og parametere.
- Operatørnivå (passord) - lese-/skrivetilgang til alle innstillinger og parametere, men ikke tilgang til konfigurering av systemet.
- Systemnivå (høyest autoritet) (Passord) - full lese-/skrive- tilgang til alle innstillinger og parametere (også konfigurering av hele systemet)

Alarmer og sikkerhetsfunksjoner

Hvis en alarm oppstår, vil alarm LED på håndterminalen begynne å blinke. LED vil fortsette å blinke så lenge det finnes ukvitterte alarmer. Hvis det er flere aktive alarmer legges disse i en alarmliste. Alarmlisten viser type alarm, tid og dato og alarmklasse - A, B eller C:

- Alarmklasse A - stopper vifter og lukker spjeld eller setter aggregatet i en spesiell modus iht. konfigurasjon.
- Alarmklasse B - er kun for å informere brukeren om en feil, men aggregatet vil fremdeles gå så normalt som mulig.
- Alarmklasse C - Kun som informasjon om at aggregatet er satt i manuell modus.

Flexibelt system

En servicetekniker vil kunne tilpasse reguleringen videre etter brukerens ønsker:

- Luftmengdereguleringsform kan endres fra VAV til CAV, dette inkluderer andre innstillinger for regulering, settpunkter for m³/t ved CAV (Constant Air Volume) regulering og montering av trykkgivere på tilluftsvifte og avtrekksvifte.
- Temperaturreguleringsform kan endres fra tilluftregulering til avtrekksregulering. Softwaren er klargjort for denne endringen. I stedet for start og stopp via det innebygde urprogrammet, kan aggregatet startes når det er personer i rommet vha en PIR føler (bevegelsesdetektor) eller med et opptreksur. (begge tilgjengelig som tilbehør fra Systemair).

Spjeld - tilluft, med spjeldmotor

Spjeldet skal geides på utsiden av aggregatet på tilluft før filter. Spjeldet åpnes og lukkes med spjeldmotor.

Spjeld - avkast, med spjeldmotor

Spjeldet skal geides på utsiden av aggregatet på avkast før filter. Spjeldet åpnes og lukkes med spjeldmotor.

Vannvarmebatteri og kjøling - returvann-temperaturføler for frostbeskyttelse av varmebatteri

Separate batterier for varme og kjøling. Kontrollsignaler til shuntventiler er 0-10V DC og tilførselspenning er 24V AC.

Shuntventil m/motor og returvannsføler til vannvarmebatteri leveres med av Systemair. Kablene mellom regulator og shuntventil/returvannføler er installert og testet av Systemair - klar for oppstart.

Regulatoren gir alltid et signal til shuntventil for å sikre tilstrekkelig gjennomstrømning av varmt vann for å beskytte batteriet mot frost.

Temperaturen på returvannet sendes til regulatoren fra en frostføler. Beskyttelsessekvens er aktiv også når aggregatet er stoppet, dette gir en ekstra beskyttelse av batteriet. Hvis returvanntemperaturen faller under settpunktet for frostvakt, stopper viftene og spjeldene stenger.

Shuntventil m/motor for kjølebatteri inngår ikke, men er tilgjengelig som tilbehør fra Systemair.

Komponenter for kjølestyring er ikke installert av Systemair.

Kommunikasjon med BMS via webserver/EXoline TCP/IP

Regulatoren kan fungere som et stand-alone system. Regulatoren har også integrert webserver for enkel tilgang og styring via nettleser. I regulatoren er det en 8-polet kontakt som kan kobles direkte til en PC med en krysset nettverkskabel eller til et lokalt nettverk. Kunde må da installere E-tool på datamaskinen for å kommunisere med regulatoren. E-tool kan lastes ned gratis fra www.regin.se. E-tool må være konfigurert for DHCP klient med automatisk IP adresse.

Regulatoren er ferdig programmert fra Systemair med fabrikkinnstillinger. Modifikasjoner i programmet foretas via håndterminalen eller via E-tool-programmet på en PC tilkoblet regulatoren.

7.15 Anvisning

Framgangsmåte for luftlekkasjemåling av bygninger ved bruk av byggets ventilasjonsanlegg

1 Generelt

1.1 Innhold

Anvisningen beskriver luftlekkasjemåling av bygninger ved å benytte byggets eget ventilasjonsanlegg. Det er her beskrevet forberedelser, klargjøring, måling, etterarbeid og rapportering.

Anvisningen er ment som et supplement til den internasjonale standarden NS-EN ISO 9972:2015 [1] da den ikke gir en konkret beskrivelse av luftlekkasjemålinger ved hjelp av ventilasjonsanlegget.

1.2 Hensikt

Anvisningen kan benyttes ved måling av bygninger eller deler av bygninger. Den beskriver målinger av luftstrømnings-hastighetene som oppstår over en rekke trykkforskjeller mellom inne og ute.

2 Krav

I byggt teknisk forskrift (TEK17) [2] stilles det krav til lekkasjetall for bygninger som er ferdigstilt. I ISO 9972 fremgår det at ved luftlekkasjemålinger skal «alle rom som klimareguleres med hensikt» måles.

Anvisninger gjelder kun for én sone, men dersom bygget består av flere soner kan disse behandles som en sone dersom innvendige dører åpnes eller det induseres et likt trykk i tilstøtende soner.

3 Måleprinsipp, krav og forutsetninger

3.1 Måleprinsipp

Deler av eller hele bygningen trykkesettes med byggets ventilasjonsanlegg. Det er anbefalt å benytte både over- og undertrykk. Nødvendig volumstrøm for å oppnå ønsket trykkforskjell registreres. Prinsippet bygger på at samme luftmengde som passerer viften også passerer gjennom utettheter i klimaskjermen.

Videre i anvisningen er det forklart ulike metoder som kan benyttes for å finne nødvendig luftmengde. Metodene deles inn i to nivåer:

- Nivå 1: Nøyaktig måling i henhold til NS-EN ISO 9972:2015. Denne metoden egner seg som tredjepartskontroll og dokumentasjon i henhold til forskriftskrav/energimerking.
- Nivå 2: Forenklet metode med enkelte avvik fra NS-EN ISO 9972:2015. Egner seg som rask egenkontroll under byggeprosessen.

3.2 Krav til ventilasjonsaggregat

For å kunne benytte ventilasjonsanlegg til måling av lekkasjetall stilles det flere krav til aggregatet. Det første som må kontrolleres er aggregatets kapasitet. Se punkt 3.3 for utfyllende informasjon. Det må også være mulig å kjøre anlegget med kun tilluft eller avtrekk, slik at det oppnås over- og/eller

undertrykk. For å kunne måle flere punkter må viftene kunne turtallsreguleres.

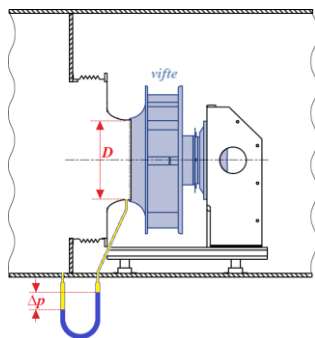
Ved måling av trykkdifferanse over dyseinnløp må k-faktor være kjent. K-faktor kan bli oppgitt fra produsent eller beregnes ved følgende formel:

$$k \cong \frac{d^2}{c} \quad (3.1)$$

Hvor:

- d er innløpsdiameter, målt på det smaleste punktet [mm]
- C er konstant for venturidyser og kan settes til 390 for de fleste moderne vifter med standardavvik $\pm 3\%$ og $\pm 10\%$ for 99% konfidens.

Ved bruk av forenklet metode forutsettes det at ventilasjonsaggregatet har en tilkoblet trykkavleser som viser gjennomgående luftmengde eller trykkfall.



Figur 1: Trykkmåling ved venturiformet innløp [3].

Ved måling av trykkdifferanse over roterende varmegjenvinner må målene på rotor være kjent. En må ha oversikt over gjenvinnerens diameter og dybde, aluminium godstykkelse, wave height og wave length. Målene kan finnes ved å ta kontakt med rotorprodusenten, eventuelt utføre egne målinger med målestokk. Eurovent

sertifiserer ulike rotormodeller, og den riktige modellen kan finnes i deres dokumenter når målene er kjent. Luftmengde og trykkfall finnes i Eurovent Certification, og benyttes ved beregning av k-faktor:

$$k = \frac{q}{\Delta p} \quad (3.2)$$

Hvor:

- q er luftmengde [m^3/h]
- Δp er trykkfall [Pa]

3.3 Forutsetninger

Ventilasjonsanlegget må være klargjort før målingene utføres. Anlegget må være tilkoblet strøm, og kanalene må være ferdig montert. Det stilles ikke krav til monterte ventiler ved måletidspunkt, da målingene ikke påvirkes av dette. Hvis ventiler er montert behøver de ikke være innregulert, og de kan gjerne være helt åpne.

I tillegg må det være mulig å måle luftmengdene i anlegget og inntaks- og avkastvifter må kunne reguleres separat for å oppnå anbefalte trykkforskjeller over klimaskjerm. Anlegget skal til enhver tid ha konstant luftstrøm. Det er viktig å kontrollere at aggregatet har kapasitet til å levere nødvendig trykk. Dette kan gjøres ved å benytte følgende formel og sammenligne med aggregatets viftekurve:

$$q = C\Delta P^n \quad (3.3)$$

Hvor:

- q er luftmengde [m^3/h]
- C er lekkasjekoeffisient [m^3/hPa]
- ΔP er trykkforskjell [Pa]

- n er lekkasjeeksponent. Anbefalt verdi er 0,6-0,7. Verdien skal ikke være lavere enn 0,5 eller overskride 1,0.

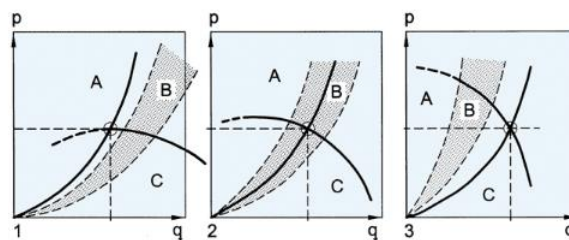
For å beregne lekkasjekoeffisienten benyttes følgende formel:

$$C = \frac{n_{50}V}{\Delta P^n} \quad (3.4)$$

Hvor:

- n_{50} er antatt lekkasjetall [h^{-1}]. n_{50} er angitt som krav eller høyeste anslag på lekkasjetall.
- V er innvendig volum [m^3]

Eksempel 1: Krav til lekkasjetall er $0,6 \text{ h}^{-1}$, byggets volum er 9300 m^3 og lekkasjeeksponent er satt til 0,67. Ved trykkdifferanse over fasade på 50 Pa gir dette en luftmengde på $5582 \text{ m}^3/\text{h}$. Ved avlesning i viftekurve skal det legges til eksternt trykkfall over kanalsystemet ved gjeldende luftmengde. Typiske verdier er angitt i NS 3031 tillegg H. Verdi for yrkesbygg er 250 Pa for og 100 Pa for bolig. Derfor skal viftekurven avleses for eksternt trykk på $250+50=300 \text{ Pa}$ for yrkesbygning eller $100+50=150 \text{ Pa}$ for bolig. Aggregatets viftekurve kan benyttes for å kontrollere om aggregatet har kapasitet til å levere nødvendig luftmengde ved ønsket trykk, se Figur 2. Dersom skjæringspunktet mellom trykk, p , og luftmengde, q , ligger innenfor det skraverte området har viften tilstrekkelig kapasitet. De fleste aggregat-leverandører har programvare (produktvalgsværktøy) som kan benyttes til å beregne driftspunktet. Driftspunktet beregnes da ved $5585 \text{ m}^3/\text{h}$ og 300 Pa eksternt trykk.



Figur 2: Viftekurve [4].

Lekkasjetallet beregnes etter følgende formel:

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \quad (3.5)$$

Hvor:

- \dot{V}_{50} er lekkasjeluftmengde ved en trykkforskjell på 50 Pa [m^3/h].

4 Utstysrliste

- *Differansetrykkmåler/ digitalt manometer*
Ved måling av trykk bør det benyttes både differansetrykkmåler for måling av trykkdifferanse over fasaden og digitalt manometer for måling i aggregat. Begge instrumentene skal ha målenøyaktighet på $\pm 1 \text{ Pa}$. For differansetrykkmåleren vil det være tilstrekkelig med en rekkevidde på 0-100 Pa, men for manometeret bør rekkevidden være 0-2000 Pa.

Det er anbefalt å benytte minst to trykkmålere. Helst bør det være to trykkmålere for å måle i aggregat (for rotor og dyse) og to eller flere for å måle over fasaden. Trykkdifferanse over fasaden bør måles i 1. etasje og i toppetasje. Hvis det ikke er vindstille bør det benyttes flere trykkmålere for å måle ulike kardinalretninger.

- *Temperaturmåler*
Ved måling av temperatur skal det benyttes et instrument som kan måle temperaturen med en nøyaktighet på $\pm 0,5$ K. Det er fordelaktig om instrumentet har kort responstid og en tynn ledning slik at det vil være mulig å måle i aggregat med lukket dør. Det er anbefalt å benytte et termoelement.
- *Viftekurve/ beregningsprogram*
For vurdering av aggregatets viftekapasitet.
- *Plastslanger, T-stykker og tynne kapillærrør*
Ved måling av trykk er det nødvendig med minst fire plastslanger og minst tre tynne kapillærrør. Kapillærrør er en kort rørbit (metall eller plast) som tåler å bli bøyd uten at den kollapser eller tettes. Røret bør monteres med 90° vinkel for å unngå å bli bøyd i klem, se figur 3. T-stykker kobles til stusser ved måling over dyse.



Figur 3. Montering av rør for måling av trykkdifferanse over fasade.
[Foto: M. Smidt].

- *Laseravstandsmåler*
Ved måling av nøyaktig areal og volum av testsonen.
- *Tetningsteip/ papp*

Benyttes for å forsegle lekkasjeområder. I store ventilasjonsaggregat kan det være nødvendig å tette filterkassetene foran viftene med papp for å unngå lekkasje.

- *Stige/ gardintrapp*
Nødvendig for å få tilgang i f.eks. kanaler og aggregat som er festet i himling.
- *Verneutstyr*
Om målingene utføres på byggeplass er det viktig å ha med verneutstyr som arbeidsklær, hansker, briller, vernesko og hørselvern.

5 Forberedelser

5.1 Planlegging

Før målinger og forberedelser kan starte bør det foretas en befaring hvor en får tilstrekkelig oversikt og informasjon om bygget, se tabell 1. Dette gjelder spesielt ved store bygg. Punkter som bør noteres ved befaring er:

- Hvilke områder som skal måles, hele eller kun deler av bygget? Om kun deler av bygget benyttes må det gjøres en vurdering av hvilke interne luftlekkasjer som kan aksepteres.
- Beregningsgrunnlag for volum og arealer. Se plantegning. Dette bør være beregnet til testdagen. Beregning av volum og areal gjøres etter punkt 6.1 i ISO 9972. Det er her viktig å huske at sonens høyde måles fra dekkekant til dekkekant.
- Type ventilasjonsaggregat og roterende varmegjenvinner med tilhørende mål og k-faktor. Viftemodell i aggregatet må også være kjent for å finne viftens k-faktor.
- Ventilasjonsaggregatets produsent, modell, type automatikk for turtallstyring og kapasitet.
- Type/dimensjon vifteinnløp,
- Type/dimensjon varmegjenvinner.

- Plassering av differansetrykkgivere.
- Oversikt over kanalsystem. Hvilke spjeld skal strupes og holdes åpne? Se plantegning.
- Hvilke åpninger som må tettes. Både innvendig og utvendig.
- Krav til lufttetthet.
- Bygningskategori.
- Kontroller med entreprenør om bygget er klart for luftlekkasjemåling.

5.2 Klargjøring

Før målingene starter er det viktig å sjekke at alt er klargjort, se sjekklister i tabell 2. Ved klargjøring av store bygg kan det være en fordel å være flere personer da det kan ta lang tid å kontrollere hele bygget. Vind og temperatur må registreres, enten ved bruk av termometer eller henting av data fra nærmeste målestasjon. Kapittel 5.2 i ISO 9972 angir metoder for klargjøring av bygget.

For måling av referansetrykk over klimaskjerm skal ventilasjonsaggregat være avslått og forseglet. Det er da viktig å passe på at åpninger fra tillufts- og avtrekkssiden er lukket. Om aggregatet har installerte stengespjeld kan disse lukkes helt. For å forsikre at åpningene er helt forseglet er det anbefalt at det i tillegg teipes over filterkassetene i aggregatet, se figur 4.



Figur 4. Teiping av filterkasset. [Foto: M. Smidt]

Tabell 1. Sjekkliste for klargjøring før måling av luftlekkasjer.

Sjekkpunkt	Kommentar
Gjør en avtale med ansvarlig kontaktperson hos entreprenør.	Særlig viktig for store bygninger, men også en fordel for øvrige bygninger. Samme kontaktperson bør tilkalles ved flere målinger.
Gjør en avtale om befaring i god tid før målingene skal utføres.	Mest relevant for store bygninger, men også en fordel for øvrige bygninger.
Gjør en avtale med servicetekniker for ventilasjon eller vaktmester.	Særlig viktig for store bygninger, da det er behov for en person som kjenner til anlegget under målingene.
Pass på at snitt- og plantegninger for de aktuelle sonene som skal måles er oversendt i forkant til personen som skal utføre luftlekkasjemålingen.	
Pass på at det er tilgjengelig strøm til måleutstyr og godkjent utstyr for arbeid i høyden.	Mest aktuell for store, høye bygninger.
Avgrens/lukk målesonen.	Kan være utfordrende i store bygninger.
Pass på at det er mulig å slå av den ene viften i aggregatet uten at det stopper pga. alarm.	Last ned produktdokumentasjon for aktuelt aggregat.
Få en innføring i hvordan turtall på viften kan endres.	Last ned produktdokumentasjon for aktuelt kontrollpanel.
Kontroller at aggregatet har kapasitet til å levere ønsket trykk.	Last ned produktdokumentasjon for aktuelt aggregat. Få tilgang til viftekurve.
Lag en sjekkliste over utstyr som må medbringes på feltmålingen.	
Undersøk værvarsel for testdagen.	Sterk vind og lav utetemperatur er faktorer som øker usikkerheten ved målingene.
Lag et Excel regneark med ferdige likninger for beregning av luftmengde på basis av målt trykkdifferanser over både over vifteinnløp og rotor.	Denne bør være ferdig før måledato slik at begge luftmengdemålingene kan sjekkes underveis på måledatoen.

Tabell 2: Sjekkliste for måledag.

Sjekkpunkt	Kommentar
Pass på at brannskillevegger og branntetning er klargjort for måling.	Dette er mest aktuelt for soneinndeling av store bygninger og boligblokker. Om mulig bør kontrollplan og sjekkliste fra utførende gjennomgås, i tillegg til visuell stikkprøvekontroll.
Pass på at dører og branndører er justert. Kontroller at dørterskler er satt inn.	Dette er mest aktuelt for soneinndeling av store bygninger og boligblokker. Det må tettes midlertidig hvis ikke terskler skal settes inn.
Pass på at yttervinduer og ytterdører i målesonen er lukket.	I store bygninger bør det gjennomføres en ekstra kontroll før måling.
Pass på at vannlåser i toaletter, sluk, vaskemaskinavløp og vasker er fylt opp med vann eller teipet igjen.	
Pass på at alle åpninger er lukket, f.eks. spalteventiler, inspeksjonsluker, spjeld i ildsteder.	Ildsteder kan om nødvendig teipes igjen.
Pass på at åpninger som ikke kan lukkes eller utsparinger er forseglet.	Viktig ved underveismålinger i store bygninger.
Pass på at midlertidige åpninger som senere skal lukkes er forseglet.	Gjelder åpninger for solskjerming, trekkerør, osv. Lysbrytere og stikkontakter som er ferdig montert skal ikke tettes. Om kontakter og brytere er plassert på klimaskjermen er det behov for kyndig vurdering.
Pass på at alle enheter som fører luft inn eller ut fra bygningen, og som ikke brukes til trykksetting, er slått av. Dette gjelder f.eks. varmesystemer med innendørs luftinntak, mekanisk ventilasjon, klimaanlegg, kjøkkenvifter, tørketromler, osv.	Om bygninger har særlig strenge krav til lufttetthet er det anbefalt, hvis mulig, å koble av hele grensystemet inn mot sjakt. Kjøkkenavtrekk bør kobles av mot ventilator og forsegles.
Pass på at alle dører internt i aktuell målesone er åpnet.	Av praktiske og sikkerhetsmessige årsaker er det lov å holde noen dører lukket, for eksempel tilgangsdørene til heiser.
Gjør tiltak for å unngå avtrekksfarer fra varmeanlegg. Ta hensyn til varmekilder i tilstøtende leiligheter/soner.	Mest aktuelt for store bygninger og boligblokker.

<p>Brann- og røykvakter skal holdes i normal bruksstilling. Brann- og røykvakter som vanligvis er stengt og som åpnes automatisk i tilfelle brann forblir lukket, mens brann- og røykvakter som vanligvis er åpne og lukkes automatisk ved brann forblir åpne.</p>	<p>Mest relevant for store bygninger.</p>
<p>Åpninger som ikke er beregnet for ventilasjon i klimaskjermen, f.eks. postkasse installert på ytterdør eller vegg, forbrenningsapparat osv., skal være stengt.</p>	
<p>Ikke gjør ytterligere tiltak for å forbedre lufttettheten til klimaskjermen.</p>	<p>Om bygningen har en eller flere heissjakter må det vurderes om disse skal forsegles. Forsegling av heissjakt gir lavere lekkasjetall. Ved normal drift står sjaktene åpne, noe som bør vektlegges under vurderingen.</p>
<p>Når ventilasjonsanlegg brukes som måleutstyr er det viktig å ordne vifter og spjeld for å tillate systemet å over- eller undertrykke bygningen på en slik måte at total luftstrømning kan måles.</p>	
<p>Vær forsiktig når posisjon til måleutstyret velges.</p>	<p>Det er mulig at den valgte døren, vinduet eller ventilen er en stor luftlekkasje i bygningen og utelukkes fra måling pga. tilstedeværelse av det luftbehandlede utstyret.</p>

6 Måleprosedyre

Den som skal utføre målingene må sørge for at alle punktene i sjekklisten er utført før målingene kan starte. Når målingene gjennomføres er det ønskelig at entreprenør og/eller håndverker er til stedet.

6.1 Værforhold

For å kunne korrigere luftstrømningsmålingene for lufttetthet måles temperaturen inne og ute både før, underveis og etter målingene. Innnetemperatur bør måles samme sted som trykket måles.

Noter vindhastigheten. Vindens hastighet kan bestemmes visuelt ved hjelp av for eksempel trær i forhold til Beauforts skala, se Tabell D1 i ISO 9972, måles ved et anemometer eller ved å sjekke lokal værstasjon. Dersom vinden måles på stedet skal høyden hvor vinden måles noteres. Ved bruk av målinger fra værstasjoner bør det gjøres en vurdering på om vinden er representativ for plassen målingene utføres. Ved værstasjoner måles meteorologisk vind og stasjonen kan være flere kilometer unna.

6.2 Måling av trykkdifferanse

6.2.1 Nullstrømningstrykket, Zero-flow

Nullstrømningstrykket måles både før og etter testen. Det er her viktig at alle uønskede åpninger er forseglet. Måling av nullstrømningstrykket gjøres ved å koble en plastslange og et kapillærrør til referansepunktet på trykkmåleren, se Figur. 5. Kapillærrøret skal stikkes ut gjennom en døråpning eller en vindusåpning og plastslangen kobles på kapillærrøret på utsiden av vinduet og legges et stykke fra husveggen. Det er her viktig å passe på at plastrøret ligger på skrått slik at det ikke kommer i klem og at plastslangen ikke ligger i direkte sollys eller blir direkte påvirket av

vind eller vann. Det kan være lurt å plassere plastslangen et stykke fra bygget og ikke i nærheten av andre hindringer. På den andre «tappen» kobles kun en plastslange som legges innendørs. Det er viktig at de to slangene er i omtrentlig samme høyde. Punkt 5.3.3 i ISO 9972 angir maksimal trykkdifferanse for nullstrømningstrykket. Trykket bør måles ved alle fasader for å kunne beregne et gjennomsnitt.



Figur 5. Montering av trykkmåler [Foto: M. Smidt].

6.2.2 Måling av trykkdifferanse over fasade

Når anlegget settes i gang og målingene starter, måles trykkdifferansen over fasaden. Det er her viktig å vente til trykket har stabilisert seg før målingene starter. Hvor lang tid som kreves før trykket har stabilisert seg avhenger av byggets størrelse. Følg med på trykket på trykkmåleren for å se om det stabiliserer seg. Trykket måles som oftest ved laveste etasje, men ved høye bygg, på over tre etasjer, bør den måles ved øverste etasje i tillegg. Dette gjøres på samme måte som ved måling av nullstrømningstrykket ved at en stikker en plastslange ut vinduet eller døren, mens den andre plastslangen

ligger inne. Slangene bør ligge/henge i samme høyde. Det er også her viktig å unngå at plastslangen ikke blir utsatt for direkte vind og sollys, siden sollyset medfører stor temperaturdifferanse. Ved hvert angitte luftmengde skal trykkforskjellen noteres.

6.3 Styling av ventilasjonsanlegg

Om bygget har flere ventilasjonsaggregat er det mulig å benytte ett aggregat med tilstrekkelig viftekapasitet. Da må en passe på at det kun er aggregatet som skal benyttes som er skrudd på. De andre aggregatet må være avslått og tett. Det er tilstrekkelig at aggregatets stengesjeld er stengt (både tilluft og avtrekk) og har gummipakning. Dersom de mangler pakning bør den forsegles (f.eks. med tape).

For å oppnå ønsket trykksettpunkt må ventilasjonsaggregatet stilles inn slik at det blir over- eller undertrykk. For å skape undertrykk må tilluftsviften slås av og forsegles. Luftstrømningen fra avtrekk reguleres ved bruk av et kontrollpanel som er tilknyttet aggregatet. Samme prosedyre utføres ved overtrykk, men da må avtrekk bli slått av og forsegles.

6.4 Måling av lekkasjeluftmengde

Lufttetthetsmålingene utføres ved å ta målinger av luftstrømningshastighet og trykkdifferansen over fasaden ved en rekke trykkforskjeller. Ved hver test bør det benyttes minst fem datapunkt med lik avstand. Se punkt 5.3.4. i ISO 9972 for anbefalt trykkdifferanse. Det er viktig å merke seg at maks trykkdifferanse vil være avhengig av størrelsen på bygget. Det er derfor viktig å rapportere høyeste oppnådde trykkdifferanse og bakgrunn for hvorfor høyere trykkdifferanse ikke er mulig.

Målingenes nøyaktighet vil være bedre ved høyt trykk, så ved lavt trykk er det viktig å være forsiktig slik at målingene ikke ødelegges. Mens målingene pågår er det viktig å sjekke at bygningens forhold ikke har endret seg, at alt som skal forsegles fortsatt er forseglet og at ikke noen har åpnet en dør eller et vindu.

6.4.1 Måling av trykkdifferanse over vifteinnløp

Samtidig som trykkforskjellen over fasaden måles skal også trykkdifferansen over vifteinnløp måles. Det er viktig at trykkdifferansen over vifteinnløp og fasaden måles samtidig ved samme datapunkt for at målingene skal bli riktige.

Nivå 1

I et ventilasjonsaggregat er det vanligvis montert et venturiformet innløp før viftene. Ved trykkuttaket ved innløpet er det koblet en silikonslange på utsiden av aggregatet og aggregatets trykkføler. Før aggregatet blir slått på må et T-stykke festes mellom silikonslangen og aggregatets trykkføler. Deretter kobles T-stykket til differansetrykkmåleren, se figur 6. Når anlegget blir slått på og har stabilisert seg kan trykkdifferansen leses av. Turtallet på viften reguleres trinnvis for å oppnå flere målepunkter. Trykkdifferansen skal videre brukes til å beregne luftmengde, som forklart i punkt 7.2.

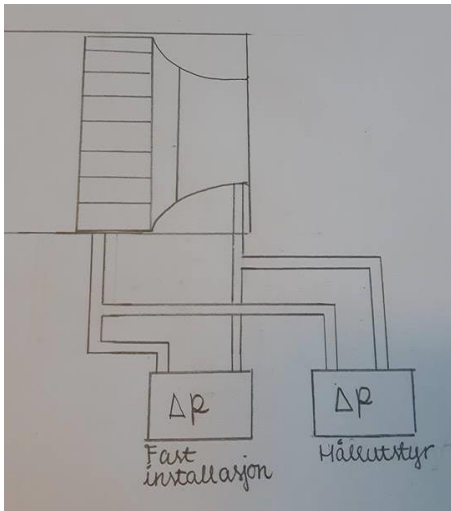
Nivå 2

Denne metoden stiller krav til at ventilasjonsaggregatet har en tilkoblet trykkføler som viser gjennomgående luftmengde eller trykkfall over vifteinnløpet. Metoden krever ikke ekstrautstyr, da

trykkdifferansen kan leses av display når anlegget er startet.



Figur 6: Tilkobling av T-stykke [Foto: E. Sørbotten].



Figur 7: Skjermategning [E. Sørbotten].

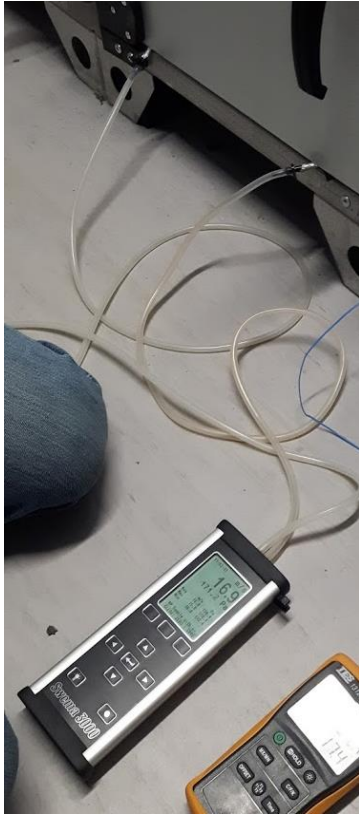
6.4.2 Kontrollmåling av luftmengde over annen komponent (roterende varmegjenvinner)

For å redusere måleavvik ved luftlekkasjemåling ved hjelp av ventilasjonsaggregat er det en fordel å måle trykkdifferanse over mer enn én komponent i aggregatet. I tillegg til måling over vifteinnløp kan det utføres kontrollmålinger over roterende varme-

gjenvinner. Dette sikrer god kvalitetskontroll.

Samtidig som man måler trykkdifferansen over vifteinnløpet, anbefales det derfor å måle trykkdifferansen over roterende varmegjenvinner (i samme luftstrøm som den aktive viften). Dette skal gjøres samtidig som trykkdifferansen over fasaden måles ved samme datapunkt for at målingene skal bli riktige.

To smale og stive slanger som ikke kan klemmes plasseres sideveis mellom dørene på hver side av roterende varmegjenvinner. Dørene har en gummilist som sikrer god tetting. Her er det viktig å passe på at slangene plasseres i området hvor luften strømmer gjennom roterende varmegjenvinner. De stive slangene kobles så til silikonslanger som igjen festes til differansetrykkføleren. Dørene lukkes før aggregatet begynner å kjøre, og trykket leses av. Turtallet på viften reguleres trinnvis for å oppnå flere målepunkter. Trykkdifferansen skal videre brukes til å beregne luftmengde, som forklart i punkt 7.3.



Figur 8: Trykkmåling over roterende varmegjenvinner ved bruk av trykkmåler, Svema 3000md [Foto: E. Sørbotten].



Figur 7: Flytskjema for valg av metode [E. Sørbotten].

6.4.3 Forenklet luftmengdemåling

Alternativt til målingen beskrevet i punkt 6.7 er det mulig å benytte en forenklet metode. Denne metoden stiller krav til at aggregatet har en tilkoblet trykkmåler som viser gjennomgående luftmengde eller trykkfall over vifteinnløpet. Denne metoden krever ikke ekstrautstyr. Trykkdifferansen leses av display etter hvert som turtallet på viften reguleres. Ved bruk av forenklet metode vil måleusikkerheten øke da det kan være feilkobling mellom slangene fra ventilasjonsaggregatet og trykkmåleren. Trykkdifferansen benyttes i videre beregning av luftmengde, forklart i punkt 7.3.

6.4.4 Korrigering av luftmengde for densitet

Målte verdier for trykk må alltid korrigeres for å gjelde ved en temperatur på 20°C. For å finne riktig lufttetthet måles romtemperatur og temperatur i aggregatet ved målepunkt for trykkdifferanse. Temperaturen kan måles ved bruk av termometer, eller leses av display ved forenklet metode. Dette beregnes etter formel (7.3).

Når luftmengden er korrigert for temperaturdifferanse mellom aggregat og rom korrigeres den videre for temperaturdifferanse mellom inne og ute, for å finne luftmengden som strømmer gjennom klimaskjermen. Dette gjøres etter formel fra punkt 6.2 i ISO 9972:

$$q_{env} = q_m \left(\frac{\rho_e}{\rho_{int}} \right) \approx q_m \left(\frac{T_{int}}{T_e} \right) \quad (6.1)$$

Hvor:

- q_{env} er luftmengde gjennom klimaskjerm [m^3/h]
- q_m er korrigert luftmengde i aggregat [m^3/h]

- ρ_e er utvendig luftdensitet [kg/m³]
- ρ_{int} er innvendig luftdensitet [kg/m³]
- T_e er utvendig absolutt temperatur [K]
- T_{int} er innvendig absolutt temperatur [K]

6.5 utfordringer underveis

- *Ikke mulig å oppnå ønsket trykkdifferanse.* Dersom det ikke er mulig å oppnå ønsket trykkdifferansen kan man ekstrapolere opp til 50 Pa ved å benytte kraftlikningen, likning (3.3). Avvik fra dette indikerer at målingen er nivå 2.
- *Ikke mulig å oppnå nullstrømnings-hastighet.* Ved måling av nullstrømningshastighet kan absoluttverdi opp til 5 Pa aksepteres, se punkt 5.3.3 i ISO 9972. Ved trykk høyere enn dette skal testen erklæres ugyldig. Punkt 5.1.1 i standarden angir maks anbefalt temperaturdifferanse iht. byggets høyde og maks vind for å kunne oppnå nullstrømning.
- *For mye vind.* Ved høy trykkforskjell vil målesikkerheten ved høy vind kunne reduseres. Det er ikke anbefalt å utføre testen ved vind høyere enn angitt i standarden da det er liten sannsynlighet for å oppnå nullstrømning.
- *Stor temperaturdifferanse mellom inne og ute som medfører skorsteinseffekt.* Her gjelder samme anbefaling som gitt i punkt 5.1.1.

7 Dataanalyse

Det anbefales at dataanalysen utføres fortløpende underveis på måledagen (i et

ferdiglagd regneark) slik at eventuelle uoverensstemmelse oppdages og feilsøking kan iverksettes umiddelbart. Et eksempel på dette er dersom man oppdager vesentlig avvik mellom luftmengde målt over vifteinnløp og kontrollmåling over rotor (e.l. komponent).

7.1 Korrigering av trykkdifferanse

Ved korrigering av trykkdifferanse over fasaden skal den gjennomsnittlige nullstrømningstrykkdifferansen trekkes fra hver av de målte trykkdifferansene, Δp_m . Dette gjøres for å finne den induserte trykkforskjellen, Δp . Benytt følgende formel:

$$\Delta p = \Delta p_m - \frac{\Delta p_{0,1} + \Delta p_{0,2}}{2} \quad (7.1)$$

Hvor:

- $\Delta p_{0,1}$ er gjennomsnittet av nullstrømningstrykket før målingene.
- $\Delta p_{0,2}$ er gjennomsnittet av nullstrømningstrykket etter målingene.

7.2 Beregning av luftmengde gjennom vifteinnløp

Luftmengden som strømmen gjennom vifteinnløpet kan beregnes ved følgende formel:

$$q = k * \sqrt{\Delta p} [m^3/h] \quad (7.2)$$

Hvor:

- k er k-faktor, som kan beregnes ved formel (3.1) eller bli oppgitt fra leverandør.

Luftmengden må korrigeres for densitet:

$$q = k * \sqrt{\Delta p} * \sqrt{\frac{\rho_{ref}}{\rho_{sann}}} \quad (7.3)$$

Hvor:

- ρ_{ref} er lufttettheten i rommet [kg/m³]
- ρ_{sann} er lufttettheten ved målepunkt [kg/m³]

7.3 Beregning av luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner

Måling av luftmengde gjennom roterende varmegjenvinner skal ikke benyttes til å beregne lekkasjetall, og behøver ikke rapporteres. Den er kun ment kontrollmåling til måling over vifteinnløp. Det er en del luftlekkasjer forbi rotor, og derfor er den vanligvis ca. 10-20% lavere enn luftmengde målt over vifteinnløp. Dersom avviket er større enn dette bør man forsøke å finne feilkilden for å bekrefte at vifteinnløp er målt riktig.

Luftstrømningen gjennom roterende varmegjenvinner er laminær, og luftmengden kan beregnes med følgende formel:

$$q = k * \Delta p \quad [m^3/h] \quad (7.4)$$

Hvor:

- k er k-faktor, som kan beregnes ved formel (3.2).
- Δp er målt trykkdifferanse [Pa]

Luftmengden må korrigeres for densitet:

$$q = k * \Delta p * \frac{\rho_{ref}}{\rho_{sann}} \quad [m^3/h] \quad (7.5)$$

7.4 Beregning av nødvendig luftmengde og lekkasjetall

Luftmengdene som er beregnet gjennom dyse og gjennom roterende varmegjenvinner må korrigeres for temperaturforskjell mellom inne og ute før nødvendig luftmengde beregnes. Både korrigering av luftmengde, beregning av nødvendig luftmengde, q , og lekkasjetall, n_{50} , gjøres etter punkt 6.2 og vedlegg C i standarden.

7.5 Usikkerhet

Med k-faktor prinsippet må det forventes at metodefeilen er opptil 10% ved beregning av luftmengde gjennom komponenter i ventilasjonsaggregatet [5]. Standardavvik for vifter dokumentert av EBM-papst og Ziehl-Abegg er på ca. $\pm 3\%$ [3]. Ved rolige værforhold er det antatt en samlet usikkerhet $< 10\%$ for lufttetthetsmålingene, mens ved vindfulle forhold kan usikkerheten være opptil $\pm 20\%$. Det må påberegnes en liten usikkerhet ved måleinstrumentene som benyttes, men standarden angir krav om hvor stor den usikkerheten kan være.

8. Målerapport

Når lufttetthetsmålingen er fullført skal det alltid utarbeides en målerapport. Rapporten skal utføres etter punkt 7 i ISO 9972.

8.1 Måleprotokoll etter ISO 9972

Måleprotokoll for lufttetthetsmålinger som er utført ved hjelp av bygningens ventilasjons-anlegg må utarbeides manuelt. Data som bør fremkomme av protokollen er:

- Dato for målingen, bygningens adresse og hvem som har utført målingen.
- Den målte sonens volum og areal.
- Beskrivelse av alle forberedelser, dvs. alle steder som ble tettet før måling.
- Beskrivelse av metoden for trykksetting (aggregat, type tvangsstyring) og luftmengdemåling (vifteinnløp).
- Kurver for over- og undertrykkmålinger.
- Beregnet volumstrøm og lekkasjetall ved trykkdifferanse på 50 Pa.
- Lekkasjekoeffisient, C , eksponenten, n , for over- og undertrykk. Det er her viktig at n ligger mellom 0,5-1,0. Anbefalt verdi er ca. 0,6-0,7.
- Instrumentering.
- Utetemperatur og temperatur i målt sone, vindstyrke og måleusikkerhet.

supplement til den internasjonale standarden NS-EN ISO 9972:2015.

9. Utarbeidelse

Denne anvisningen er utarbeidet av Marie Smidt og Elina Våge Sørbotten. Den er utarbeidet som en del av masteroppgaven ved OsloMet – storbyuniversitet, våren 2018. Anvisningen er ment som et

Målerapport

Utført av (firma): _____

Firmas adresse: _____

Utført av: _____

Byggets adresse: _____ Leilighetsnummer: _____

Dato for måling: _____ Dato for rapport: _____

Beskrivelse av testsone:

Byggeår:

Høyde:

Areal:

Innvendig volum:

Status for alle åpninger i klimaskjermen; lukket, forseglet, åpen:

Status for alle åpninger i testsonen; lukket, forseglet, åpen:

Detaljert beskrivelse av midlertidige forseglede åpninger:

Produktdokumentasjon for ventilasjonsaggregat:

Produktdokumentasjon for roterende gjenvinner:

Over- og/eller undertrykk:

Måleutstyr:

Måleforhold:

Inne- og utetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]:

Vindhastighet [m/s] og vindretning:

Vær; opphold, regn, sol:

Resultat:

Referansetrykk før målinger [Pa]:

Referansetrykk etter målinger [Pa]:

Gjennomsnittlig referansetrykk [Pa]:

Lister over målte trykkdifferanser [Pa] med tilhørende lufthastighet [m^3/h]:

Luftlekkasjeforhold for q og ΔP :

Lekkasjeeksponent, n :

Lekkasjekoeffisient, C :

Nødvendig luftmengde, q_{50} :

Lekkasjetall, n_{50} :

Måleusikkerhet:

Referanser

- [1] Standard Norge, «NS-EN ISO 9972:2015 Bygningers termiske egenskaper. Bestemmelse av bygningers luftlekkasje. Viftetrykkmetode,» Standard Norge, 2015.
- [2] DiBK, Byggt teknisk forskrift (TEK17), 2017.
- [3] P. G. Schild, *Nomogram for måling av luftmengde for vifter med Venturi-vifteinnløp*, Oslo, 2018.
- [4] M. Sandbakken, «552.308 Viftestøy og energiforbruk til vifter,» *Byggforskserien*, 2002.
- [5] P. Johansson og A. Svensson, *Metoder för mätning av luftflöden i ventilationsinstallationer*, Stockholm: Forskningsrådet Formas och författarna, 2007.
- [6] S. Ingebrigtsen, *Ventilasjonsteknikk del 2*, Oslo: Skarland Press AS, 2016.
- [7] Fläkt Woods, «Plug Fan - Technical data,» Fläkt Woods.
- [8] S. Holøs og T. Aurlien, «474.624. Luftlekkasjemåling av bygninger. Hensikt og vurdering,» *Byggforskserien*, 2014.