



KANDIDAT NR.
22

TILGJENGELIGHET
Åpen

OsloMet – storbyuniversitetet

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

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Telefon 67 23 50 00

www.oslomet.no

Masteroppgave

PROSJEKTOPPGAVENS TITTEL	DATO
Ringledning i ventilasjon - Målinger og simulering av ventilasjonsanlegget til et casebygg.	15. juni 2020
	ANTALL SIDER/ANTALL VEDLEGG
	75/5
FORFATTERE	VEILEDERE
Sissel Suen	Peter Schild
	Mads Mysen

UTFØRT I SAMARBEID MED	KONTAKTPERSON
GK	Mads Mysen

SAMMENDRAG

Denne rapporten omhandler analyse av ringledning i ventilasjon med Gjennestad Videregående skole som casebygg. For korttidsmålingene ble det tvangsstyrt ulike belastnings-scenarioer, mens langtidsmålingene var under normal drift. Det vekslet mellom åpent og lukket spjeld for å etterligne ringledning og tradisjonell to-grenet utforming. I tillegg til trykkmålingene ble det innhentet verdier for luftmengder, tilluftstemperatur, vifteeffekt og trykk. Datene ble brukt for å kontrollere at verdiene fra SD-anlegget og programvaren er til å stole på. Resultatet viser at ringledning har lavere trykk, lufthastighet og vifteeffekt. Konklusjonen er at forskjellene ikke er store nok. Dermed beholdes de generelle dimensjoneringskriteriene.

3 STIKKORD
Ringledning
Ventilasjon
Dimensjonering

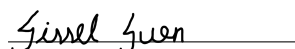
Forord

Rapporten er utarbeidet av masterstudenten Sissel Suen ved OsloMet — Storbyuniversitetet på sivilingeniørutdanningen Energi og Miljø i Bygg, ved fakultetet for teknologi, kunst og design. Masteroppgaven er utarbeidet i samarbeid med GK og er en avsluttende hovedoppgave for mastergraden vår 2020. Oppgaven utgjør 30 av 120 poeng fra det toårige masterprogrammet. Målet med oppgaven er å undersøke ringledning i ventilasjon med Gjennestad Videregående skole som casebygg.

Hensikten med rapporten er å gi et bedre grunnlag for bruk av ringledning i ventilasjon. Det er ønskelig at denne rapporten brukes til videre forskning og veiledning for bedre forståelse av ringledninger. Arbeidet med masteroppgaven startet i desember 2019 og avsluttes med en fullstendig rapport 15. Juni 2020.

Først ønsker jeg å rette en stor takk til min interne veileder Peter Schild, for å ha vært med under hele perioden og gitt jevnlig oppfølging. Jeg vil også takke alle fra GK som har tatt del i oppgaven, spesielt Mads Mysen som har gitt meg denne muligheten og stilt opp som min eksterne veileder. Takk til driftsansvarlige på Gjennestad Videregående skole, Geir Fossnes, for fleksibiliteten for at jeg kan å komme og dra fra skolen når som helst. Videre vil jeg takke Lars Jensen for utrolig engasjement og rask tilbakemelding med PFS simuleringen. Tilslutt ønsker jeg å takke familien min for støtte gjennom hele studietiden i både gode og onde dager. Jeg ville aldri klart det uten noen av dere!

Dato: 15. Juni 2020



Sissel Suen

Sammendrag

I denne rapporten ble ringledningen på Gjennestad videregående skole brukt for målinger og simuleringer. Oppgaven ble gitt av GK på grunn av mangel på dokumentasjon for ringledninger i ventilasjon. Det ble utført litteraturstudie, trykkmålinger, innhenting av verdier fra SD-anlegget og simuleringer. Hensikten med rapporten er å dokumentere funksjonen og dimensjonering av ringledning i ventilasjon med Gjennestad videregående skole som casebygg.

I litteraturstudiet ble det samlet inn generell informasjon om ventilasjon, studier som omhandlet ringledning i ventilasjon, nåværende trykkfall- og lydberegning for ringledninger og tilslutt andre fagområder som bruker ringledningsløsning.

Casebygget ble brukt for trykkmålinger for korttids- og langtidsperiode. I korttidsmålingene ble ventilasjonsanlegget tvangsstyrt til ulike belastningsscenarioer, mens langtidsmålinger ble målt under normalbruk. Det veksles mellom åpent og lukket spjeld i enden av kanalen for å simulere ringledning og to-grenet tradisjonell ventilasjon. Resterende dataer for tilluftstemperatur, luftmengde, vifteeffekt og trykk for både aggregat, trykkregulatorspjeldene og ventilene ble hentet direkte fra SD-anlegget. Det ble også foretatt kontrollmålinger av trykk og tilluftstemperatur i forhold til SD-anlegget. I tillegg ble det utført kvalitetssikring av dataene fra SD-anlegget.

Flere egnede simuleringsprogrammer ble vurdert før valget endte med PFS. Det er simulert både for tradisjonell og ringledning. Ventilasjonsanlegget simuleres med de samme belastningsscenarioene som for korttidsmålingene. Resultatet sammenlignes med trykkmålingene og lufthastighet beregningene. Det ble også simulert med originaldimensjon og økning av kanaldimensjon. Dette er for å undersøke påvirkningen av høyere kanaldimensjon og forskjellen mellom tradisjonell og ringledning.

Resultatet av kontrollmålingene og kvalitetssikringen viste at tilluftstemperatur, trykk og total luftmengde stemmer med SD-anlegget. Trykkmålingene fra ventilene og PFS simuleringen var tilsvarende like. Derimot hadde trykkmålingene fra instrumentet blitt påvirket av målefeil. Lufthastigheten stemte også overens med simuleringen utenom belastning 3. Vifteeffekt for korttidsmålingene viste at ringledningen er lavere enn tradisjonell løsning. Det er grunn til å tro at forskjellen er på grunn av ubalansert belastning, slik som belastning 3. Derimot var vifteeffekten tilnærmet like for langtidsmålingene. Dette skyldes at trykkdifferansen mellom enden av kanalen er balansert eller at andre deler av bygget har påvirket. Den maksimale trykkdifferansen viser betydelig lavere trykk for ringledningen ved

luftmengder over 400 L/s. Dette betyr at vifteeffekten skulle vært lavere, dersom vifteeffekten kun målte for ringledningen.

Resultatet av PFS simuleringen viser at luftmengden fordeles jevnere ved bruk av ringledning. Trykkfallet for ringledningen vil også være lavere. Ved å øke kanaldimensjonen i simuleringen får man mindre forskjell mellom ringledning og tradisjonell for lufthastighet, trykktapsgradient og trykk. Belastning 3 viser derimot større forskjeller for ringledningen og tradisjonell.

Konklusjonen er at ringledningen på Gjennestad videregående skole reduserer trykk, lufthastighet og vifteeffekt. Det er også større forskjell på ringledningen dersom systemet driftes i ubalanserte belastninger. Forskjellen er derimot ikke stor nok og derfor beholdes de generelle dimensjoneringskriteriene for tradisjonelle ventilasjonsanlegg.

Innhold

1 Innledning	7
1.1 Bakgrunn for oppgaven	7
1.2 Problemstilling	7
1.3 Mål	8
1.4 Begrensninger og forutsetninger	8
1.5 Rapportens oppbygging	9
2 Beskrivelse av casebygg	10
2.1 Gjennestad videregående skole	10
2.1.1 Ventilasjonsanlegget	11
2.2 Produktbeskrivelser	12
2.2.1 HIS spjeld	12
2.2.2 Aktiv tilluftsventil - TTC	12
2.2.3 SD-anlegg	13
3 Litteraturstudie	14
3.1 Ventilasjonsanlegg	14
3.1.1 Tradisjonell ventilasjon	14
3.1.2 Ringledning i ventilasjon	15
3.1.3 Trykk	15
3.2 Tidligere studier om ringledning i ventilasjon	17
3.2.1 Dimensjonering	17
3.2.2 Luftfordeling	17
3.2.3 Trykkfall	17
3.2.4 Besparelse av vifteeffekt og metallareal	17
3.3 Nåværende trykkfall- og lydberegning	18
3.4 Ringledning i andre fagområder	18
4 Metoder for casebygg	20
4.1 Måleusikkerhet	20
4.2 Paret T-test	21
4.3 Måleinstrumenter	22
4.4 Statisk trykk	23
4.4.1 Målepunkter	23
4.4.2 Korttidsmåling	24
4.4.3 Langtidsmåling	25
4.5 Målinger fra Piscada/Lindinspect	26
4.5.1 Datahåndtering	26
4.6 Kontrollmålinger og kvalitetssikring	26

4.6.1	Tilluftstemperatur	26
4.6.2	Trykk	27
4.6.3	Total luftmengde	28
5	Metode for simulering	29
5.1	Valg av programvare	29
5.2	Kontrollmålinger og kvalitetssikring	30
5.2.1	Trykk	30
5.2.2	Lufthastighet	30
5.3	PFS simulering	31
5.3.1	Tips før simulering	31
5.3.2	Casebygg	31
5.3.3	Erfaring	32
6	Resultater	33
6.1	Kontrollmålinger og kvalitetssikring av SD-anlegg	33
6.1.1	Tilluftstemperatur	33
6.1.2	Trykk	33
6.1.3	Total luftmengde	37
6.2	Kontrollmålinger og kvalitetssikring av PFS	38
6.2.1	Trykkdifferanse	38
6.2.2	Lufthastighet	40
6.3	Vifteeffekt	41
6.3.1	Paret T-Test	43
6.4	Trykkdifferanse for langtidsmålinger	43
6.4.1	Paret T-Test	46
6.5	PFS simulering	46
6.5.1	Luftmengde	47
6.5.2	Trykkfall	47
6.5.3	Økning av kanaldimensjon	49
7	Diskusjon	53
7.1	Trykkmålinger	53
7.2	Kontrollmålinger og kvalitetssikring	53
7.2.1	Lindinspect	54
7.2.2	PFS	55
7.3	Trykkdifferanse	56
7.4	Simulering av casebygg	56
7.4.1	Økning av kanaldimensjon	57
7.5	Besparelser	58
7.5.1	Vifteeffekt	58

7.5.2	Plassbesparelse	58
7.5.3	Material- og monteringskostnader	59
7.6	Kanaldimensjonering	59
8	Konklusjon	60
9	Videre arbeid	61
10	Vedlegg	64
	Vedlegg A Paret T-Test av korttidsmålinger for vifteeffekt	65
	Vedlegg B Paret T-Test av maksimal trykkdifferanse	66
	Vedlegg C Resultat av PFS simulering for casebygg	68
	Vedlegg D MagiCAD veiledning for ringledning i ventilasjon	70
	Vedlegg E PFS veiledning for ringledning i ventilasjon	73

1 Innledning

Dette kapittelet er ment for å definere oppgavens relevans, bakgrunn, mål, begrensninger og forutsetninger samt litt informasjon om casebygget, Gjennestad videregående skole (heretter omtalt som casebygg).

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Det har blitt stor fokus på å tenke fremtidsrettet. Dette fører til at det legges mer vekt på energieffektivisering ved å ha strengere krav til bygg og installasjoner. Ingeniører streber hele tiden med å utvikle nye løsninger, for å fremheve potensialet til å utnytte dagens ressurser på en effektiv måte. Derfor bygger denne oppgaven på en av mange løsninger som finnes innenfor ventilasjonsanlegg, såkalte ringledning i ventilasjon.

Ringledning i ventilasjon brukes av bedriften GK med stort hell, men det finnes ingen dokumentasjon eller veiledende dimensjoneringskriterier. Den nåværende kunnskapen om ringledninger i ventilasjon er at det fungerer godt på de byggene det har blitt installert i. Det de mener er at det reelle trykkfallet er lavere enn det som beregnes ved bruk av programvaren Revit med MagiCAD.

Masteroppgaven er utarbeidet i samarbeid med GK og er tiltenkt lest av fagpersoner innenfor feltet. Rapporten har som hensikt å undersøke ringledning i ventilasjon på casebygget, for å dokumentere funksjonen og dimensjoneringskriterier. I tillegg utføres en litteraturstudie i forhold til tidligere erfaring og forskning. Forhåpentligvis vil denne rapporten kunne avdekke enkelte punkter og gi en bedre forståelse for systemet.

1.2 Problemstilling

Med utgangspunkt i dagens kunnskap om ringledning i ventilasjon, har denne oppgaven følgende problemstillinger:

- Hvilke besparelser får man?
- Hvilke dimensjoneringskriterier bør brukes for ventilasjon med ringledninger?

1.3 Mål

Ut fra ringledningen på casebygget er målet å finne mulige veiledninger for dimensjoneringskriterier. Vurderingen gjøres på grunnlag av målinger og simuleringer i sammenligning med to-grenet tradisjonell utforming. Fra resultatet vil rapporten ha som mål å være en fremtidig veiledning for dimensjonering av ringledning i ventilasjon og støtte til videre forskning.

Det er også laget noen delmål for å underbygge rapportens helhet:

- Anskaffe relevant informasjon om ringledning
- Innhente data fra sentral driftskontroll anlegg (SD-anlegg)
- Utføre trykkmålinger på ventilasjonsanlegget.
- Bruke programvare for simulering av ventilasjonsanlegget.

1.4 Begrensninger og forutsetninger

Det er lagt til grunn begrensninger og forutsetninger for å avgrense oppgavens omfang. Oppgaven startet med forberedelser i desember 2019 og varer til juni 2020. Dette er en tidsbegrensning i forhold til hvor mye som kan undersøkes. Det er derfor lagt vekt på å undersøke trykk i oppgaven. Siste del av måleperioden ble casbygget stengt for elever på grunn av COVID-19. Dette medførte til mindre bruk av bygget som kan ha påvirket dataene. En annen begrensning er at oppgaven ble utført i vinter med gradvis økning av temperatur. Utendørstemperaturen har noe å si fordi anlegget styres etter både luftmengdebehov og romtemperatur. Oppgaven er også avhengig av at personer tilknyttet til prosjektet er ledig for å bistand, ved å få istand måleuttakene samt informasjon- og erfaringsutveksling. Det er nødvendig å få bakgrunnsinformasjon slik at man kan styre anlegget fritt, uten å hindre anlegget fra å drifte normalt etter endt måleperiode. En annen begrensning er at man er avhengig av at ventilasjonsanlegget fungerer som det skal. Programmeringen av systemet og kalibreringen av sensorene ble gjort klart i slutten av Januar 2020. Dette betyr at verdiene i SD-anlegget før februar 2020 er feilaktige verdier. Instrumentet er også en begrensning. For å få et godt resultat er man avhengig av ny kalibrerte instrumenter. Swema3000md var nylig anskaffet og hadde en anbefalt kalibreringstidspunkt om fem år. DPM manometeret anbefales å kalibrere en gang i året. Det er derimot usikkerhet til når den sist ble kalibrert.

Forutsetningene som settes i grunn for målingene er at det ikke blir påvirket av omgivelsene. Det ses bort ifra omgivelser og påvirkningfaktorer innenfor

måleperioden. Utetemperatur, solforhold og støykilder varierte under langtidsmålingene og kan ha påvirket bruken av bygget. For målingene ble det innhentet verdier av luftmengde, temperatur, trykk og vifteeffekt fra SD-anlegget (Piscada/Lindinspect). Hvorvidt man kan stole på om sensorene er plassert riktig eller om de er kalibrert riktig er noe man må forutsette. Det gjøres kontrollmålinger og sjekk om enkelte verdier stemmer. Likevel forutsettes det at alle verdiene som er hentet fra anlegget er korrekte for bruk i oppgaven. I tillegg forutsetter man at programvaren (PFS) som brukes for simulering er godkjent og av høy kvalitet for en masteroppgave løsning. Det gjennomføres beregninger for å undersøke og kvalitets sikre at programmet stemmer med målinger for å minimere usikkerheten.

1.5 Rapportens oppbygging

Rapporten består av ni kapitler.

- Kapittel 1 *Innledning*: er grunnlaget for oppgavens bakgrunn og mål. Det er ment for å gi en raskt introduksjon til oppgaven.
- Kapittel 2 *Beskrivelse av casebygg*: gir litt om casebygget, ventilasjonssystem og produktbeskrivelser.
- Kapittel 3 *Litteraturstudie*: er en systematisk oversikt over nåværende kunnskap om ringledning.
- Kapittel 4 *Metoder for casebygg*: forklarer metodene som brukes for målinger og beregninger på casebygget.
- Kapittel 5 *Metode for simulering*: forklarer metoden for valg av programmet og hvordan man simulerer ved bruk av PFS.
- Kapittel 6 *Resultater*: presenterer resultatet av målingene, beregningene og simuleringen.
- Kapittel 7 *Diskusjon*: diskuterer resultatene, eventuelle avvik og tolkninger.
- Kapittel 8 *Konklusjon*: gir en overordnet konklusjon på masteroppgaven.
- Kapittel 9 *Videre arbeid*: gir forslag til videre forskning innenfor ringledning i ventilasjon.

2 Beskrivelse av casebygg

I dette kapitlet beskrives bakgrunnen av casebygget, Gjennestad videregående skole. Dette bygget brukes for målinger og simuleringer i oppgaven.

2.1 Gjennestad videregående skole

Gjennestad videregående skole ligger ved Gjennestadtunet 10 i Vestfold. Skolen har omtrent 140 elever og 25 ansatte. De har et annet bygg fra tidligere som fortsatt brukes til undervisning og kontorer. Det er plassert ved siden av det nye bygget. Det nye bygget er casebygget i oppgaven. Det ble ferdigstilt i desember 2019 og består av to etasjer tilsvarende 920m². Det er klassifisert som et miljøfyrtårn. Taket er installert med solcellepaneler og vegg/gulv er av massivtre. Første etasje har tre klasserom, en foajé og noen mindre rom, mens i andre etasje er det kontorer. Kontorene deles av lærere og ansatte fra et regnskapsfirma.

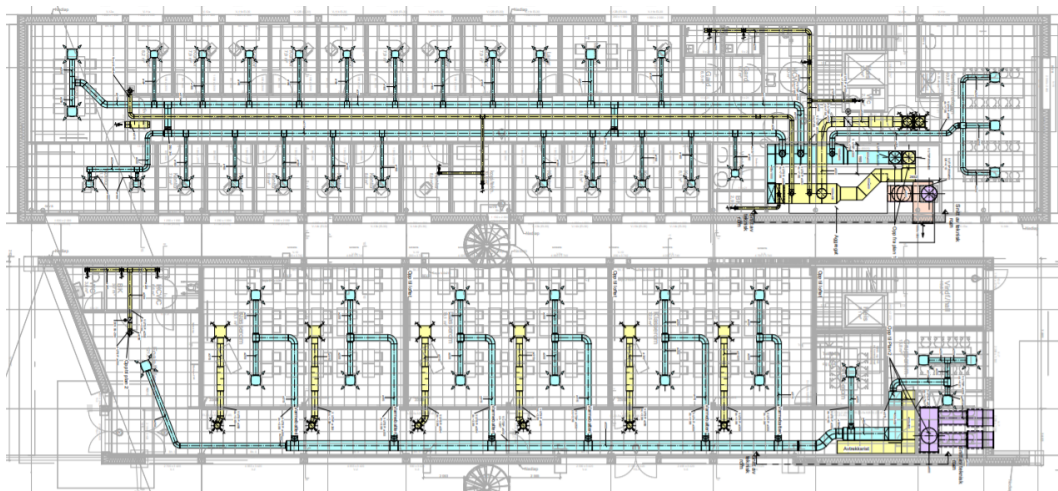


Figur 1: Gjennestad Videregående Skole. Foto: Sissel Suen.

2.1.1 Ventilasjonsanlegget

Ventilasjonsanlegget til casebygget er trykkoptimalisert og behovsstyrt. Dette vil si at anlegget styres både mot spjeldvinkel og konstant trykk. Det er brukt aktive tilluftsventiler av typen TTC fra Lindinvent.

Figur 2 viser plantegningen av ventilasjonsanlegget. Anlegget er bygget over to etasjer. Første etasje har en tradisjonell utforming av ventilasjonskanaler, mens andre etasje har mulighet for ringledning på tilluftssiden og tradisjonelt på avtrekkssiden.



Figur 2: Plantegning av ventilasjonsanlegget på Gjennestad vgs.

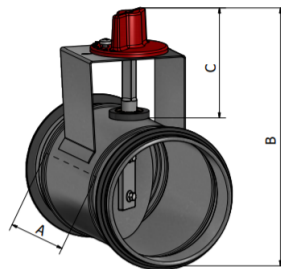
Denne oppgaven har hovedfokuset på ringledningen. Det er derfor 2.etg som er av relevans for nærmere undersøkelser. Øvre del av figur 2 viser tilluftskanalene (blå) koblet i ring. Den har to stengespjeld (HIS spjeld) som kobler kanalene sammen til en ringledning ved åpen posisjon. Ved stengt posisjon i begge spjeldene vil ventilasjonen oppføre seg som et tradisjonelt anlegg. I tillegg er det to trykkgulatorspjeld montert på hver side før første grenkanal til rommet, men de er ikke tegnet inn i plantegningen. Plasseringen av disse er markert senere som T1 og T2 i figur 7.

2.2 Produktbeskrivelser

Her gis en oversikt over produkter som brukes på ventilasjonsanlegget på casebygget. Det er nødvendig med bakgrunnskunnskap og informasjon om produktene som kan påvirke resultatet.

2.2.1 HIS spjeld

Det er brukt to HIS spjeld fra leverandøren Hallströms på anlegget. Spjeldet (figur 3) er et sirkulær stengeblad for ventilasjonskanaler som kan styres manuelt. Den er godkjent i tetthetsklasse C og D etter 1666/78. [1].



Figur 3: HIS spjeld fra Hallströms

2.2.2 Aktiv tilluftsventil - TTC

TTC er modellen for aktiv tilluftsventil som leveres av Lindinvent. Ventilen er bygd opp av lameller, motor, trykk- og luftmengde-, kanaltemperatur-, romtemperaturmåler, kretskort, tilstedeværelsesdetektor og belysningsstyring. Ved å endre avstandsåpningen i lamellene varierer tilført luftmengde. Det er en takmontert tilluftsvifte. Hver ventil har en node-ID som er koblet til det overordnede systemet og kan styres gjennom SD-anlegget.

Målinger	Nøyaktighet
Kanaltemperatur	$\pm 0,5\text{K}$
Tilluftsmengde	$\pm 5\%$ eller minst $\pm 2 \text{ l/s}$
Trykk	$\pm 5\%$ eller minst $\pm 3 \text{ Pa}$

Tabell 1: Nøyaktighet av målinger fra TTC



Figur 4: TTC aktive tilluftsventiler fra Lindinvent

2.2.3 SD-anlegg

Sentral driftskontroll anlegg (SD-anlegg) styrer og overvåker automatikken i et bygg. SD-anlegget på casebygget kan styres gjennom en skybasert løsning på nett. Det er ikke nødvendig å være tilstede på bygget for å kunne endre eller overvåke automatikken. Systemet som brukes heter Piscada. I Piscada kan man finne oversikten over ventilasjonsaggregatet, varmeanlegg og energiforbruk. I tillegg er det en funksjon for romkontroll som er koblet videre til Lindinspect. Lindinspect er et nettbasert grensesnitt utviklet for Lindinvent systemet. I Lindinspect kan man kontrollere rommene for temperatur og luftmengde samt overvåke systemet. Det er også mulig å hente historiske verdier fra anlegget.

3 Litteraturstudie

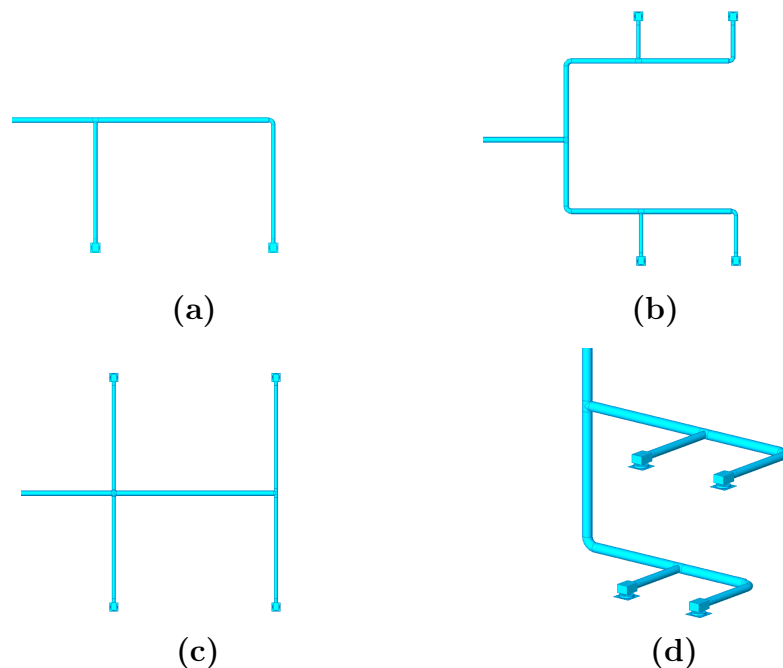
Litteraturstudiet er ut fra tilgjengelige studier og personlig kommunikasjon med fagpersoner innenfor ventilasjon og ringledning. Informasjonen gir en oversiktlig kunnskapsstatus om feltet.

3.1 Ventilasjonsanlegg

Ventilasjonsanlegg sikrer luftmengdebehovet og består av tilluft- og avtrekkskanaler, ventiler og aggregat. Her presenteres to ventilasjonstyper for bedre forståelse av oppgaven: tradisjonell og ringledning.

3.1.1 Tradisjonell ventilasjon

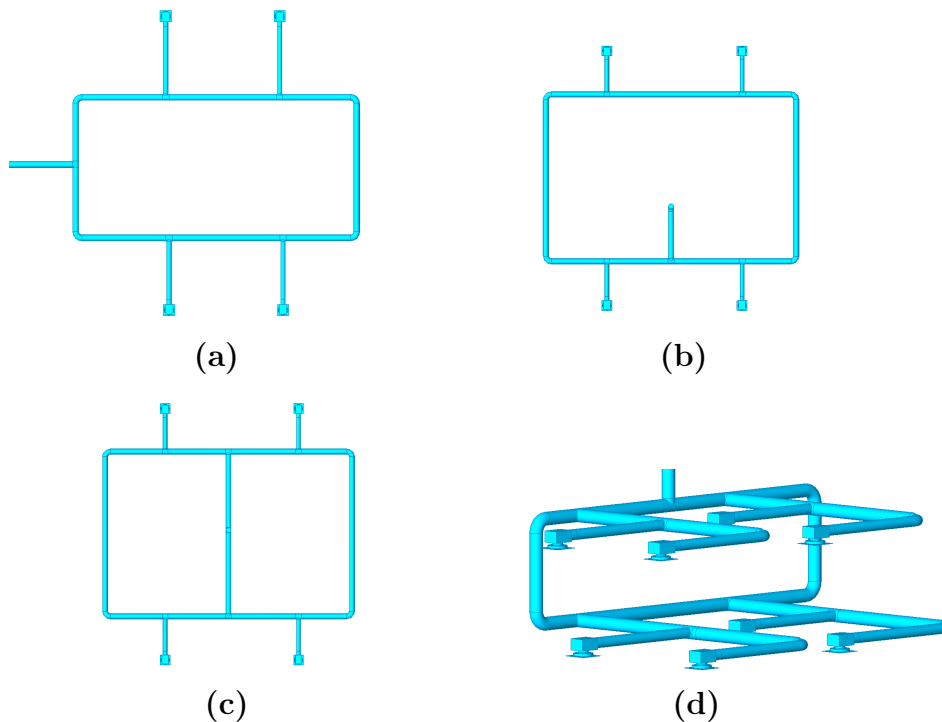
Tradisjonell ventilasjon også kalt F-system eller radiell system er den mest brukte løsningen for utformingen av ventilasjonsanlegg i bygninger. Den grunnleggende utformingen er slik som navnet tilsier F-formet. Det finnes flere utforminger; grunnleggende, to-grenet, treform og stigeform [2]. Figur 5 viser eksempler på de ulike tradisjonelle utformingene. Luftstrømningen går i én retning og inn til hvert rom.



Figur 5: Tradisjonelle utforminger. Laget av Sissel Suen. (a) Grunnleggende (b) To-grenet (c) Treform (d) Stigeform

3.1.2 Ringledning i ventilasjon

Ringledning i ventilasjon har blitt brukt i mange år, men det er ikke like anerkjent som den tradisjonelle løsningen. Hovedkanalen er sammenslått på begge ender slik at det dannes en ringform. Et rom kan bli tilført luft fra flere retninger ut fra enkleste vei fra aggregatet. Figur 6 viser eksempler på utforminger av ringledninger. Luftstrømningen kan gå i begge retninger avhengig av luftmengdebehovet fra hver side. Ringledninger kan få tilførsel av luft fra en av sidene (Fig. 6a), fra midten av ringen (Fig. 6b og 6c) eller være vertikalt oppstilt mellom etasjer (Fig. 6d).



Figur 6: Ringledning utforminger. Laget av Sissel Suen.

Prinsippet for å bruke ringledning gjelder dersom det er begrenset himlingsplass, varierende kvalitet på luftforsyning på grunn av solbelastningen, planlagte utvidelser av anlegget, endring av CAV til VAV eller ønske om reduksjon av metallkostnader [3]. Dersom man bruker en konstant diameter vil fabrikasjonen og monteringen være kostnadseffektivt [2].

3.1.3 Trykk

Trykket i ventilasjonskanalen er en viktig faktor på hvor mye aggregatet må tilføre anlegget. Trykk har enheten pascal (Pa) og betegnes som kraft per areal. Det

skilles mellom statisk-, dynamisk- og totaltrykk. Det totale trykket er summen av statisk og dynamisk trykk.

$$P_t = P_s + P_d \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

Trykkfall: også kalt trykktap, er friksjonstapet som oppstår mellom luftstrømmen og kanalveggen. Friksjonstapet påvirkes av blant annet luftens viskositet, kanalens ruhet og strømningsstype. Trykkfallet varierer ut fra kanalnettet og installerte komponenter. Ved prosjektering av ventilasjonsanlegg beregnes trykkfallet for den strekningen med høyest trykkfall.

Statisk trykk: er trykket som måles i forhold til atmosfæretrykket. Trykket er av væske/gass som står i ro. Det betegnes enten som positivt eller negativt avhengig om kanalen har over- eller undertrykk.

Dynamisk trykk: kalles også for hastighetstrykket og oppstår på grunn av strømninger. Dette trykket tar i betraktningen av effekten som hastigheten på væsken/gassen medbringer. Dynamiske trykket er alltid oppgitt med en positiv verdi som er avhengig av lufthastigheten. Den kan beregnes ved:

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Hvor:

ρ : Luftens tetthet (kg/m^3)

v : Lufthastighet (m/s)

[4].

3.2 Tidligere studier om ringledning i ventilasjon

Det er begrenset tilgjengelig informasjon om ringledning i ventilasjon. Det er derfor gjort et forsøk på å samle informasjon om nåværende kunnskap og hva som har blitt undersøkt. Det ble funnet totalt tre tekster skrevet av fagpersoner med ulik forskningsområde.

3.2.1 Dimensjonering

Den forenklete metoden er å beregne total luftmengdebehov i området som skal tilføres av ringledningen og deretter dele det på to. Hovedkanaldimensjonen velges deretter ut fra halve luftmengdebehovet. Denne dimensjonen holdes konstant for hele ringen. Det antas at det ikke skal være strømninger i balansepunktet. [2]. Rektangulære kanaler bør ha en lufthastighet mellom 1600 til 1800 fpm (ca.8-9m/s), mens sirkulære bør være 1900 til 2300 fpm (ca.9,7-11,7m/s). [3].

3.2.2 Luftfordeling

Artikkelen «*Measurement and predictions for the flow distribution of a complex duct system with loop for energy saving*» undersøkte luftfordelingen i et kanalsystem med både ringledning og tradisjonell utforming. Ved bruk av eksperimentelle målinger, numerisk beregning (CFD) og utvidet T-metode ble luftfordelingen analysert. Øvre delen består av en ringledning løsning og nedre del er tradisjonell løsning. Resultatet ble at 46% av total luftmengde i systemet gikk mot ringledningen. Grunnen var at ringledningen hadde mer kompleks struktur enn den tradisjonelle og ville derfor oppleve høyere trykkfall. CFD beregningene viste tilsvarende luftmengde fra hver luftutgang som målingene. Utvidet T-metoden avvirket derimot mer i enkelte utgangspunkter. Årsaken var trolig bruken av trykktapskoeffisienten for spjeld og kanalene. Denne artikkelen fokuserer på å sammenligne metodene for å finne luftfordelingen. [5].

3.2.3 Trykkfall

En del av studiet til G.J. Levermore «*Duct Loop Systems - Savings and Performance*» beregnet trykkfallet i fire utforminger av ventilasjonskanaler. Det ble beregnet at trykkfallet for ringledning og to-grenet tradisjonell er likt, mens grunnleggende tradisjonell gir størst trykkfall. [2].

3.2.4 Besparelse av vifteeffekt og metallareal

Det har blitt forsket på besparelsen av å bruke ringledning for både vifteeffekt og metallareal. «*Duct Loops and VAV Modelling and Control*» viser til store og små

tradisjonelle og ringledning løsninger. Kanalene ble designet på to måter; konstant hastighet mellom 10 og 15m/s og konstant trykkfallsgradient på 1 Pa/m. Ved sammenligning mellom designmåtene og systemtypene ble det funnet at ringledninger kan spare opptil 35% vifteeffekt iforhold til tradisjonell løsning designet etter konstant hastighet. I tillegg kan man redusere kanaldiameteren med 65% ved bruk av 900mm for ringledning med tradisjonell 1400mm hovedkanal som referanse. [6].

Tilsvarende studie ble gjort i «*Duct Loop Systems - Savings and Performance*». Det forskes på fire ulike utforminger av kanalsystemer; to grenet tradisjonell, treformet tradisjonell, grunnleggende tradisjonell og ringledning. Resultatet fremstiller ringledning og treformet tradisjonell system i forhold til metallarealet og vifteeffekt. Det er tydelig at den tradisjonelle treformede vil trenge mer vifteeffekt og har en lavere andel metall enn ringledningen. [2]

Begge studiene har ulik utgangspunkt og har derfor ulik formulering av konklusjonen. Den første sammenligner kanalsystemer med ulik dimensjoner og nedtrapping av dimensjoner, mens den andre har en konstant diameter på ringledningen. Derfor vil besparelsen av metallandelen være ut fra hvordan man designer anlegget.

3.3 Nåværende trykkfall- og lydberegning

Ut fra tidligere prosjekter har det blitt brukt en forenklet metode for å beregne trykkfallet og lyd i ventilasjonssystem med ringledning. MagiCAD er en plug-in i Revit som brukes for å beregne både trykkfall og lyd i kanalnett. Begrensningen kommer av at programmet ikke klarer å beregne for ringledninger. Det som har blitt gjort til nå er å dele ringledningen i to deler. For å dele kanalnett må det beregnede trykkfallet på hver side være tilsvarende like. Dersom trykkfallet ikke er likt på begge sider av kanalnett, flytter man delingen til man finner balansepunktet. Dette trykkfallet som beregnes vil være det maksimale trykkfallet anlegget vil ha. Når begge sider er balansert kan man utføre lydberegninger i samme program. Det er ikke dokumentert for resultatet, men ut ifra erfaringer fra fagpersoner vil trykkfallet være lavere enn det som er beregnet. [7].

3.4 Ringledning i andre fagområder

Ringledninger brukes ikke bare i ventilasjonssammenheng, men det har blitt brukt i flere andre fagområder. Et par eksempler som bruker ringledning løsningen er vann-distribusjon, gassdistribusjon, elektriske kretser og mer. Konseptet er det samme som for ventilasjon at de er koblet i ring.

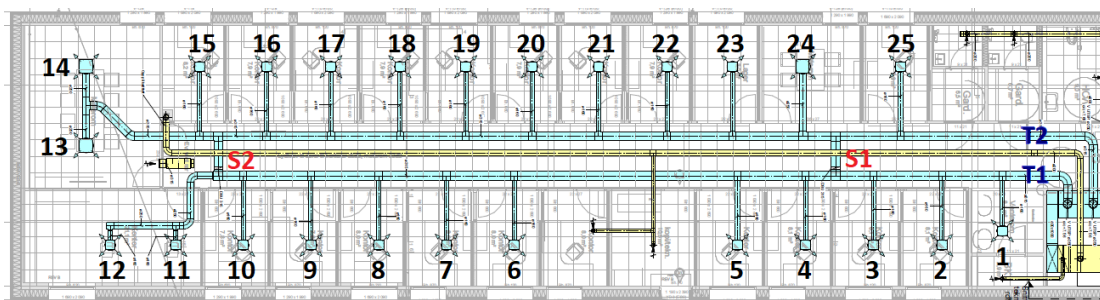
Vanndistribusjon: Ringledning for vanndistribusjon brukes for å øke hydraulisk pålitelighet og tilgjengeligheten av vann. Ringledningen har en stor dimensjon på hovedrøret med flere mindre rør koblet til. Denne måten å distribuere vannet til offentligheten kan sikre vanntilførselen også ved rørfeil. [8].

Gassdistribusjon: Naturgass distribueres til offentligheten i rør slik som vann. Det finnes flere studier for beregning av vannsystemer enn for gass. For dimensjonering av ringledning for gass brukes Hardy Cross metode. Denne metoden beregner strømmingen og trykkfordelingen uavhengig av antall rør, ringer, inngang- og utgangsnoder. [9].

Elektriske kretser: Det finnes to typer ringledninger for elektriske kretser, åpen og lukket ring. For begge systemene kan strømmen tilføres i begge retninger. Åpen ringsystem betyr at alt er koblet sammen i ring, utenom en bryter som er åpen. Ringen blir omgjort til to radielle kretsløp. Dette gir en enklere rekonfigurasjon og restaurering av hver side ved å endre åpningspunktet. Et lukket ringsystem har alt lukket. Alle bryterne vil være effektbrytere som kan gjøre slutt på hele kretsen. Dersom det er feil ett sted i ringledningen, vil hver ende av ringledningen kobles fra for å isolere feilen fra resten av anlegget. [10].

4 Metoder for casebygg

I dette kapitlet presenteres metoder for målinger, innhenting av data og beregninger for casebygget. Innhentet data er med hensyn på ringledningen som ble undersøkt. Det er derfor lagt fokus på deler av 2.etasje markert med ventilnumre i figur 7. T1 og T2 er trykkreguleringspjeld som er satt til 250 Pa. Dette er for å sikre at pjeldene er helt åpne under hele måleperioden. Under forsøksperioden var stengespjeld S1 stengt, mens S2 varierte mellom åpent/stengt for å etterligne ringledning/tradisjonelt anlegg.



Figur 7: Navngitte ventiler, stengespjeld og trykkreguleringspjeld

4.1 Måleusikkerhet

Måleusikkerhet kommer fra målinger utført for å innhente informasjon. Det medfølger usikkerhet i mange faktorer som avlesning-, avrunding-, metode- eller instrumentfeil. Måleusikkerhet kan deles inn i to typer:

- Type A: er en statistisk analyse av en serie observasjoner under identiske forhold.
- Type B: er vitenskapelig vurdering basert på tilgjengelig informasjon fra for eksempel produsenter.

Usikkerheten bak resultatet beskriver intervallet man kan forvente at den sanne verdien ligger innenfor. Dette beskrives ved hjelp av statistikk (Type A). Det samles en mengde tallverdier som presenteres og beregnes, slik at det gir informasjon til å kunne totalvurdere resultatet. Hensikten med å utføre statistiske undersøkelser er å skaffe kunnskap om ett sett med verdier.

Standardavvik er et mål for spredningen av verdiene. Det er et typisk avvik fra gjennomsnittsverdien og regnes som området hvor den sanne verdien ligger. Ett standardavvik tilsvarer 68% og kan beregnes etter denne formelen:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad [-] \quad (3)$$

Hvor:

σ : Standardavvik

x_i : Måleverdi

\bar{x} : Middelerdi av måleverdiene

n : antall måleverdier

[11]

Målefeil (Type B) er forskjellen mellom målt verdi og sann verdi. For å beregne sannsynlig målefeil summeres instrument-, metode- og avlesningfeil ved bruk av formelen:

$$m_m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2} \quad [\%] \quad (4)$$

Hvor:

m_1 : Instrumentfeil

m_2 : Metodefeil

m_3 : Avlesningsfeil

Dersom middelerdien beregnes ut fra minst 15 måleverdier med minimum tidskonstant på 0,1s, kan avlesningsfeilen elimineres. Ved bruk av standard metode for målinger kan man minimalisere metodefeilen. Målepunkter i ventilasjonskanaler anbefales å være fem ganger kanaldiameter oppstrøms og to ganger kanaldiameter nedstrøms for hindringer. Et bend eller innsnevring vil kunne påvirke målingene på grunn av endring av luftstrømningen. Ut ifra hvilke parametere som skal måles finnes det forskjellige metoder for måltaking. [12].

4.2 Paret T-test

T-test er en statistisk hypotesetest. Testen brukes for å undersøke om gjennomsnittsverdien i et normalfordelt datasett er forskjellig fra en nullhypotese. En T-test deles inn i uavhengig og parat. Uavhengig T-Test brukes dersom datasettene er fra to forskjellige grupper. Parat T-test brukes når begge datasettene er fra samme utvalg. [11].

Det er brukt parat T-Test for korttidsmåling av vifteeffekt og maksimal trykkdifferanse. Det brukes for å undersøke om det er en signifikant forskjell mellom verdiene. Det ble brukt excel for å utføre en parat T-Test:

1. Åpne excel og legg inn add-ins "Analysis ToolPack"
2. Gå til "Data" → "Data Analysis"
3. Velg "t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances"
4. Marker datasettene
5. Sett Alpha: 0,05 (95% konfidensintervall)
6. Trykk OK for beregning

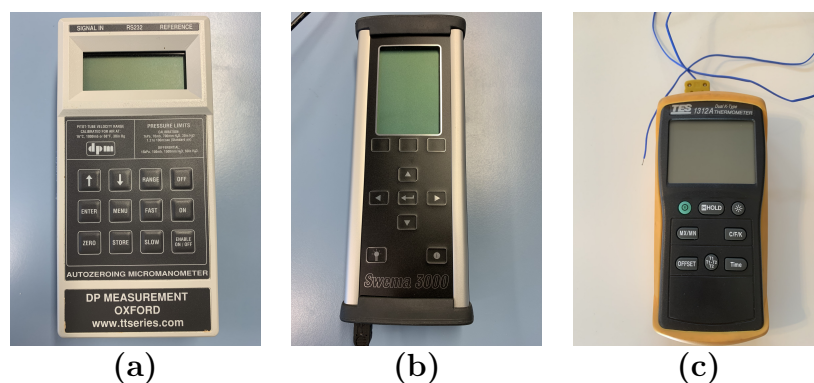
P-verdien er resultatet av T-testen. Det er et konfidens tall for bekreftelsen av nullhypotesen. Dersom tallet er 1 betyr det at nullhypotesen er korrekt, mens 0 betyr at det ikke er det. Signifikans defineres som 1-konfidens.

4.3 Måleinstrumenter

Det ble benyttet ulike instrumenter for trykk- og kontrollmålinger. Tabell 2 viser en oversikt over måleinstrumentene samt deres egenskaper.

Måleinstrument	Måler	Enhet	Område	Nøyaktighet	Oppløselighet	Fabrikkat	Lab. nummer
DPM TT 570	Trykk	Pa	±0 til 7,5kpa	10<±0,2 10>±1% ±0,1	0,1	TTseries	IKLU4
Swema 3000md	Trykk	Pa	-300 til 1500	±0,3%	0,1	Swema	IKLO32
Termometer 1312A	Temperatur	°C	-150 til 1370	±0,05%+0,5°C	0,1	TES	-

Tabell 2: Samlet instrumentinformasjon



Figur 8: Måleinstrumenter (a) DPM TT 570 (b) Swema3000md (c) Termometer 1312A

Innstillingene for DPM er valgt etter standard settverdier for instrumentet. Den lengste tilgjengelige tidskonstanten var tilsvarende slow2 (10s). For Swema3000md ble innstillingene valgt etter de registrerte målingene fra Lindinspect.

Instilling	DPM	Swema3000md	Enhet
Tidskonstant	10	120	s
Intervall	60	120	s
Autozero	60	Tidskons.+3	s
Modus	Logging	Logging	

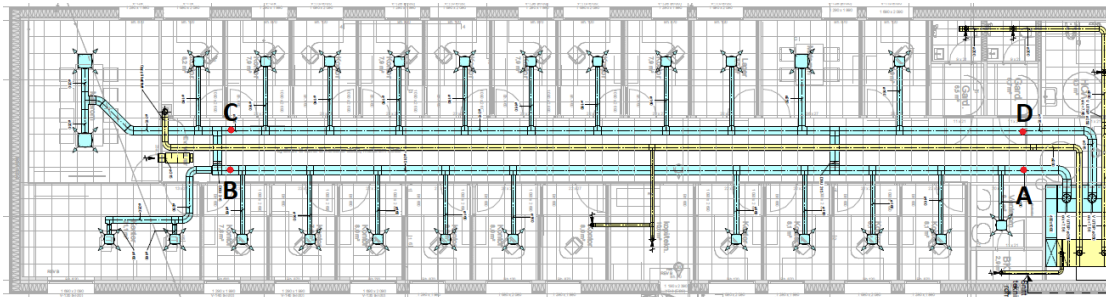
Tabell 3: Innstilling for trykkmålere

4.4 Statisk trykk

Det ble utført fysiske målinger for statisk trykk både for korttidsmålinger og langtidsmålinger. Hensikten med trykkmålinger er å undersøke om det er forskjell i trykk mellom tradisjonell og ringledning samt sammenligne det med simuleringene.

4.4.1 Målepunkter

Det brukes samme målepunkter for både korttidsmålinger og langtidsmålinger. Målepunktene er installert med plastnipler, for å unngå påvirkning av graden ved boring av kanalen. Målepunkt B er laget mellom sammenkoblingen og grenkanalen til ventilnr.10. Deretter er punkt C laget parallelt med punkt B. Alle målepunktene er lokalisert midt under kanalen. Punktene A og D er laget ved samme punkt der trykkregulatorspjeldene (T1 og T2) måler trykket i kanalen.



Figur 9: Målepunkter

4.4.2 Korttidsmåling

Korttidsmålingene ble utført 24/02/2020 mellom kl.08:00 til kl.18:00. Denne dagen ble også brukt til å lage måleuttakene sammen med en servicetekniker. Hensikten med korttidsmålinger er å undersøke flere ulike belastninger.

Utstyr:

- Swema 3000md
- DPM 570 mikromanometer
- Trykkslanger
- T-koblinger

Først ble det plassert ut trykkslanger mellom AB, BC, CD og AD. For å benytte samme målepunkt for flere slanger ble det satt inn T-koblinger. Slangene fra AB og CD gikk gjennom hele gangen måtte disse bli festet på siden. Målingene tas under ulike belastningsscenarioer på samme dag.

Belastningsscenarioer: Ventilene er gruppert etter nummer, se figur 7 for oversikt over ventilplasseringene. Under målingene hadde ventilnr.11-15 fastsatte minimum luftmengder. Disse ventilene ses bort i fra under forsøket. Tabell 4 viser en oversikt over hvilken retningsside ventilene er plassert. Hver side har 10 ventiler som styres likt i forhold til hverandre.

Retningsside	Ventilnummer
Øst	1-10
Vest	16-25

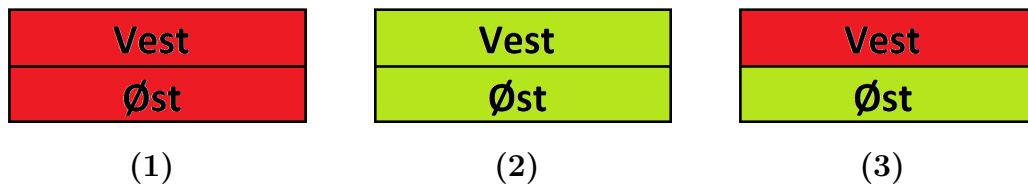
Tabell 4: Gruppering av ventiler

Ventilene har settpunkter for min.mengde børverdi, tilstedeværelsemengde børverdi og maks.mengde børverdi. For å tvangsstyre anlegget bestemmes det å bruke verdiene som er lagt inn i Lindinspect, ved å endre alle de tre parameterne til maks. eller min.luftmengde. Tabell 5 viser maks. og min. luftmengde for ventilene.

Ventilnr.	Maksimum luftmengde [l/s]	Minimum luftmengde [l/s]
1-10	50	15
11-12	50	20
13-14	100	20
15-25 (24)	50 (100)	15 (15)

Tabell 5: Maksimum og minimum luftmengde fra ventilene

Figur 10 viser illustrasjon av belastningsscenarioene. Fargen rød viser at ventilene innenfor gruppen er styrt til maksimal luftmengde, mens grønn tilsvarer minimum luftmengde.



Figur 10: Belastningsscenarioer **(1)** 100% maks. **(2)** 100% min. **(3)** 50% maks. og 50% min.

Under hver belastningsscenario ble trykkdifferanse målt med både med åpent/stengt S2 stengespjeld. Når belastningen skulle endres måtte man avvente en stund til anlegget var stabilt, før man fortsatte med målinger. Trykkdifferansen ble målt ved bruk av to trykkslanger. Den ene enden var koblet til målepunktet og andre til instrumentet. Swema3000md logget mellom målepunkt BC (figur 9) under hele perioden. Punktene CD, AB og AD ble målt med DPM mikromanometeret i 10min hver.

4.4.3 Langtidsmåling

Langtidsmålingene var fra 25/02/2020 til 24/03/2020, med oppdeling i to ukers perioder med åpent/stengt S2 spjeld.

Utstyr:

- Swema 3000md
- Trykkslanger

Under målingene er det normal drift etter behovsstyring. For hver periode logget Swema3000md ved målepunkt BC på tilsvarende måte som korttidsmålingen.

4.5 Målinger fra Piscada/Lindinspect

For korttids- og langstidsmålingene innhentes andre verdier fra SD-anlegget. Det er hentet gjennom Piscada for vifteeffekt på tilluftviften, total luftmengde og tillufttemperaturen for aggregatet. I Lindinspect hentes verdier for tilluftsmengde, trykk og åpning for ventilene og trykkregulatorene. Verdiene eksporteres til et dokument for videre håndtering.

4.5.1 Datahåndtering

Filene fra Lindinspect er i CSV. format, mens importeringen av dataene fra Swema3000md er i tekst format. Ved nedlasting vil informasjonen være samlet i en kolonne. Det ble derfor brukt funksjonen «Delimiter» på excel for å skille dato/tid og måleverdiene.

For å synkronisere og analysere nedlastet data brukes programmet «Time-Series-Explorer» [13]. Det er mulig å legge inn et ubegrenset antall dataserier som vil synkronisere tiden med målingene. Første kolonne er for dato/tid og andre for måleverdi. Det ble synkronisert måledataene med et intervall på 5min.

4.6 Kontrollmålinger og kvalitetssikring

Det er viktig å gi dokumentasjon på at innhentet data er pålitelige og av kvalitet. For å undersøke om målingene hentet fra Lindinspect er korrekte ble det utført noen fysiske og visuelle kontrollmålinger. Alle kontrollmålingene og kvalitetssikringen er utført med hensyn til dataene fra korttidsmålingene.

Utstyr:

- DPM mikromanometer
- Trykkslanger
- Termometer med termoelement

4.6.1 Tilluftstemperatur

Tilluftstemperaturen i kanalen ble målt for å kontrollere om det var tilnærmet likt med det registrerte i aggregatet. Det brukes et termometer med en termoelement i målepunkt D. Tidspunktet for målingen ble registrert for å sammenligne med aggregatets verdi.

4.6.2 Trykk

Det ble kontrollert om trykket fra trykkregulatoren (T1) viste henholdsvis riktige verdier i Lindinspect. Den ene trykkslangen ble koblet til målepunkt A, som tilsvarer punktet trykkregulatorspjeldet måler, mens den andre slangen målte trykket i rommet. I tillegg til fysiske målinger ble det visuelt kontrollert at trykkene over ventilene ble lavere desto lengre ute i kanalen ventilene var.

Deretter ble det undersøkt om trykket fra trykkreguleringspjeldet viste henholdsvis lik verdi som nærmeste ventil og om summen av trykkfallene i ringen ble 0. Nedenfor vises formelen for trykkfallet som forventes i ringledningen over målepunktene.

$$\Delta P_{AD} + \Delta P_{AB} = \Delta P_{CD} + \Delta P_{BC} \quad (5)$$

For å bruke trykket fra ventilene til beregning av trykkfall i hovedkanalen, bør verdiene korrigeres for grenkanalen og T-bendet til ventilen. Dette gjøres etter formlene nedenfor:

$$\Delta P_k = \Delta P_v + RL + \zeta P_d \quad [\text{Pa}] \quad (6)$$

Hvor:

ΔP_k : Trykkfall i hovedkanal før gren

ΔP_v : Trykkfall over ventil

R: Trykkfallsgradient

L: Lengde til grenkanal

ζ : Støttapskoeffisient

P_d : Dynamisk trykk

For å beregne trykkfallsgradienten brukes formelen for Darcy-Weisbach [14]:

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot 0,6 \cdot v^2 \quad [\text{Pa/m}] \quad (7)$$

Friksjonsfaktoren (λ) beregnes med en forenklet formel med antatt ruhet på 0,15mm for stål [14]:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\frac{k}{d}}{\frac{3,71}{d}} + \frac{68,0}{Re} \right) \quad (8)$$

$$Re = v \cdot \frac{d}{\nu} \quad (9)$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

Hvor:

v: lufthastighet i kanal

d: Indre kanaldiameter

ν : Kinematisk viskositet for luft (+20°)=0,00001511 [m²/s]

Støttapskoeffisienten (ζ) for T-bend beregnes ut fra formelen under [15]:

$$\zeta = 0,99 - 0,82 \cdot ff + 1,02 \cdot ff^2 \quad (11)$$

$$ff = \frac{-Q_2}{Q_0} \quad (12)$$

4.6.3 Total luftmengde

For kvalitetssikring av dataene ble det utført beregninger for avvik mellom trykkreguleringsspjeldene og ventilene. Det ble beregnet om summen av luftmengdene fra alle ventilene i ringledningen tilsvarte summen av T1 og T2.

5 Metode for simulering

Proessen før og metoden for simuleringen av ventilasjonsanlegget presenteres videre. Det er fokusert på riktig valg av programvare, kontroll og kvalitetssikring av programmet og hvordan man simulerer.

5.1 Valg av programvare

Før man starter å simulere kartlegges hvilket program som skal brukes. Det ble funnet noen programvarer for å undersøke hvilken som var best egnet til denne oppgaven. Det finnes flere programvarer som klarer å beregne trykkfall i ringledning. Noen eksempler er PFS, CONTAM og Dymola som forklares nærmere under.

Program Flow Systems (PFS): beregner statiske strømningsystemer. Programmet består av både brukergrensesnitt og en løser utviklet av Johnny Roos og Lars Jensen. Beregningselementet bygges opp av en syntaks som beskriver systemet og deretter en grafisk fremstilling.

CONTAM: er utviklet av NIST og brukes for innendørs luftkvalitet og ventilasjonsanalyse for å bestemme luftstrømmer, forurensningskonsentrasjon og personlig eksponering i bygninger. En modell i CONTAM bygges opp av prosjektfiler, bygningskomponenter, værdata og simuleringsmodell.

Dynamic Modeling Laboratory (Dymola): beregner systemer ved modellering og simulering basert på Modelica-språket. Modellen bygges opp av komponenter og ligninger som beskriver systemets dynamiske oppførsel. Dymola er utviklet av Dassault Systèmes.

For å gi en bedre oversikt over forskjellene og likhetene oppsummeres det i tabell 6. Det er flere spesifikasjoner til programmene, men her er det kun tatt med relevante sammenlignbare egenskaper.

	PFS	CONTAM	Dymola	Kommentar
Operativsystem	Windows	Windows/Linux	Windows/Linux	
Referanse manual	Ja	Ja	Ja	
Språk	Engelsk*	Engelsk	Engelsk	*Finnes manualer på svensk
Programspråk	Tekst/Grafisk	Grafisk	Modelica	
T-gren dokumentasjon	Ja	Nei ¹	Delvis ²	1.Fikk ikke kontakt med utvikler. 2.Dokumentasjon for blanding.
Pris	Gratis*	Gratis	Koster	*For studenter
Nedlastning	Kontakt Lunds universitet*	På nett (nist)	På nett (3ds)	*Institusjon for bygg og miljøteknikk
Bibliotek	Innebygd	CONTAM Library	Modelica Library	

Tabell 6: Sammenligning av programvarer

Det ble valgt å bruke programmet PFS etter vurdering sammen med Lars Jensen for beregning av trykkfall, trykktapsgradient og lufthastighet i ringledning. Grunnen er tilstrekkelig dokumentasjon på T-gren for trykkfall, lettleselige manualer, enkel nedlasting og tilgjengelig kontaktperson.

5.2 Kontrollmålinger og kvalitetssikring

Etter å ha valgt programvare må man kontrollere og kvalitetssikre den før man kan stole på resultatet. Det har blitt undersøkt for trykk og lufthastighet.

5.2.1 Trykk

PFS ble kvalitetssikret gjennom trykkdifferansemålingene, se kapittel 4.4.2. I PFS ble de nærmeste ventilene til målepunktene for trykk, brukt for å beregne trykkdifferansen. Her vises en liten oversikt over hvilken ventil som anses for å være den nærmeste ventilen til målepunktene.

Målepunkt	Nærmeste ventil
A	1
B	10
C	16
D	25

Tabell 7: Nærmeste ventil til målepunktene

5.2.2 Lufthastighet

Hensikten med å beregne lufthastigheten er for å sammenligne beregninger med simuleringene. Ved beregning av lufthastighet i hovedkanalen brukes formel 10. Tverrsnittsareal for en sirkulærkanal beregnes etter denne formelen:

$$A = \frac{\Pi D^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (13)$$

Det benyttes luftmengde registrert av trykkreguleringsspjeldene for både øst og vest i casebygget for beregning av lufthastigheten. Beregningen ble deretter sammenlignet med PFS simuleringen for kontroll av programvaren.

5.3 PFS simulering

Hensikten å bruke PFS for simuleringer er å undersøke besparelser ved bruk av ringledning i forhold til tradisjonell.

5.3.1 Tips før simulering

For å få tilgang til programvaren må man ta direkte kontakt med Lunds Universitet ved institusjonen for bygg og miljøteknikk. Deretter vil man kunne få programmet sendt på mail. Programmet består av to filer. Den ene er pfs.exe og andre er en løser sfs.dll. Begge filene ligger i samme mappe som blir tilsendt.

Før man starter å simulere bør man lese referanse manualen TVIT-15/7100 skrevet av Lars Jensen [16]. Dersom noe er vanskelig å forstå finnes det en svensk versjon TVIT-07/7009 som forklarer mye av det samme. Alle rapportene finnes på den offisielle siden til universitet for installations- og klimatiseringslæra: <http://www.hvac.lth.se/>. Det anbefales å gå igjennom "PFS Tutorial" dokumentet før man simulerer et helt anlegg. Den inneholder noen enkle eksempler med forskjellige input og output verdier. "PFS Tutorial" finner du på samme nettside som rapportene under "Publikationer".

5.3.2 Casebygg

Det er valgt å simulere ringledningen på casebygget for å kunne sammenligne med målinger av et reelt anlegg. Simuleringen utføres etter egen utarbeidet veiledning, se vedlegg E. Det finnes to sammenkoblinger i ringledningen på casebygget. Den første sammenkoblingen har et stengespjeld (S1) som er stengt under hele forsøket, mens den andre (S2) veksles mellom åpent og lukket. Det blir derfor ikke simulert med den første sammenkoblingen. Den andre legges til i simuleringen av ringledning og fjernes ved simulering av tradisjonell løsning.

For å beregne total trykk for ventilasjonssystemet kreves det at en enhet er avgjørende med en gitt innstilling. Ved å legge inn trykk ved en gitt luftmengde for hvilken som helst ventil, kan man se hvilken ventil som er avgjørende. Den avgjørende ventilen vil være den med høyest trykk. Deretter legger man trykk og luftmengden for den avgjørende ventilen. Under simuleringene ble det funnet ut at ringledningssystemer trenger ett felles punkt for beregning av trykk. Derfor ble dette koblet sammen med trykkfrie elementer. I tillegg til systemets trykkfall, beregnes også trykket over hver ventil, trykktapsgradienten og lufthastigheten i kanalen. Det ble gjort tilsvarende beregninger uten sammenkoblingen for å simulere

et tradisjonelt anlegg ved de ulike belastningene for å sammenligne med ringledningen.

For å undersøke mulige besparelser gjøres lignende beregning bare med én kanaldimensjon større i alle ledd. Det ble valgt å øke dimensjonen fordi trykktapsgradienten og lufthastigheten allerede hadde høye verdier.

5.3.3 Erfaring

Bruken av programmet kan leses opp i manualen, men det finnes også en god del nyttige eksempler. Erfaringsmessig anbefales det å skissere den grafiske delen på papir før det legges inn i programmet. Programmet har en begrensning på kodearket med 400 linjer og 160 posisjoner. Dette gjør at man har mer plass vertikalt enn horisontal. Det anbefales derfor å tegne anlegget vertikalt.

En ting å legge merke til er at programmet har en positiv retning fra venstre til høyre og nedover. Dette vil si at dersom man ønsker å beregne for avtrekkskanaler, må man tegne kanalene mot venstre istedenfor høyre for å få riktig retning på luftstrømmingene. Dette kan være forvirrende når man prøver å avbilde anlegget i riktig retning i programmet, på tross av at den ikke ser slik ut i virkeligheten.

Det er også mulig å få ut flere resultater samtidig ved bruk av utskriftkommandoene. Noen resultater vil derimot overlappe hverandre eller koden i utskriftsformatet. Det er derfor lurt å planlegge større plass slik at man får bedre oversikt.

6 Resultater

I dette kapitlet er det lagt fokus på faktorer som har betydning for bruken og påvirkningen som medfølger ved å velge ringledningssystem i ventilasjonsanlegg. Resultatet er dannet etter grunnlaget fra målinger og innhenting av data fra anlegget på casebygget samt simuleringer ved bruk av PFS. Resultatet deles inn i kontrollmålinger og kvalitetssikring, vifteeffekt, trykkdifferanse og tilslutt PFS simuleringer.

6.1 Kontrollmålinger og kvalitetssikring av SD-anlegg

Resultatet for kontrollmålinger og kvalitetssikring av innhentet dataverdier presenteres her.

6.1.1 Tilluftstemperatur

Tilluftstemperaturen som ble målt ved bruk av termometeret er oppgitt i tabell 8. Tidspunktet som oppgis er gjeldende for målingene tatt under korttidsmålingene 24/02/2020. Aggregatet viser innhentet verdi fra Piscada sammenlignet med målinger utført ved samme tidspunkt.

	Tidspunkt	Tilluftstemperatur [°C]
Aggregat	10:00	22,9
	10:05	23,7
Målt	10:05	22,4

Tabell 8: Tilluftstemperatur

Tilluftstemperaturen er målt til å være 22,4°C, mens den registrerte verdien er 23,7°C. Dette er en differanse på 1,3°C. Den målte verdien ser ut til å være nærmere verdien som ble registrert kl.10:00 som er 22,9°C.

6.1.2 Trykk

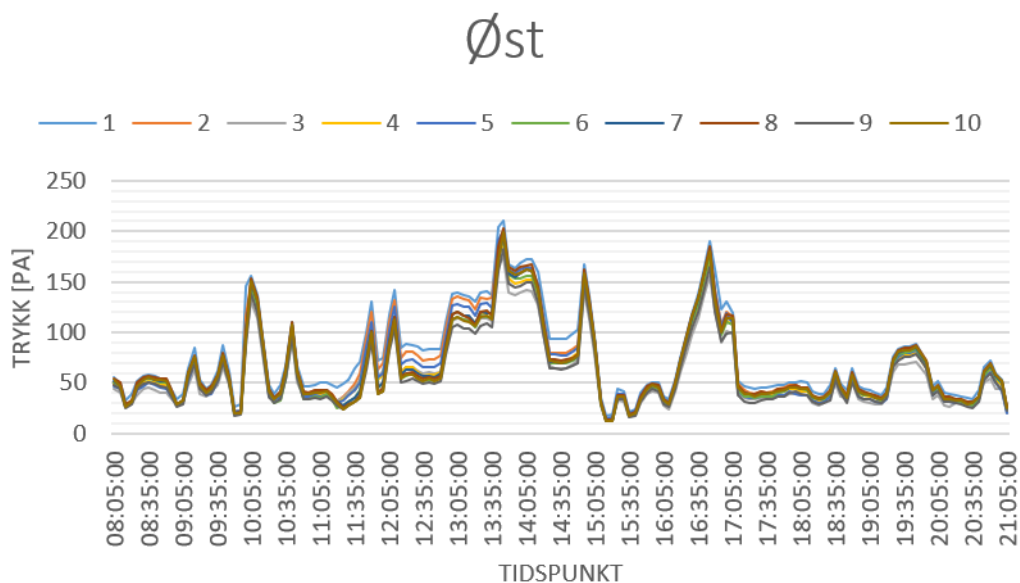
Resultatet av trykkmålingene sammenlignet med registrert trykk i trykkregulator-spjeldet (T1) vises i tabell 9. Tilsvarende som tilluftstemperaturen er målingene tatt under samme dag.

Tidspunkt	DPM [Pa]	Lindinspect [Pa]
10:13	82	88
10:15	57	59
10:17	34	38
10:19	28	30
10:21	28	29
10:23	29	26

Tabell 9: Trykk ved T1

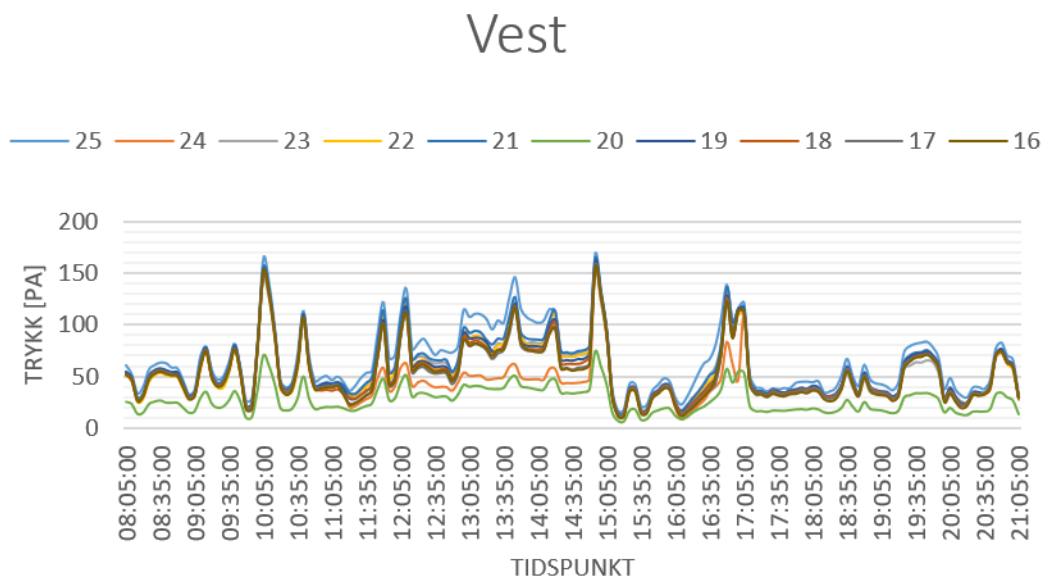
Den største differansen mellom målt og registrert verdi er 6 Pa kl.10:13. Dette utgjør en liten differanse mellom DPM instrumentet og verdien hentet fra Lindinspect. De resterende verdiene har heller ingen stor differanse. DPM verdiene ligger generelt under Lindinspect verdiene utenom den siste verdien.

Resultatet for ventiltrykkene hentet fra Lindinspect presenteres i figur 11 og 12. Hver figur viser sammenligningen mellom ventiltrykkene for hver av ventilene på hver sin side av ringledningen. Ventilene er oppgitt i rekkefølge ut fra avstanden til aggregatet og utover i anlegget.



Figur 11: Resultat av ventiltrykk på østside

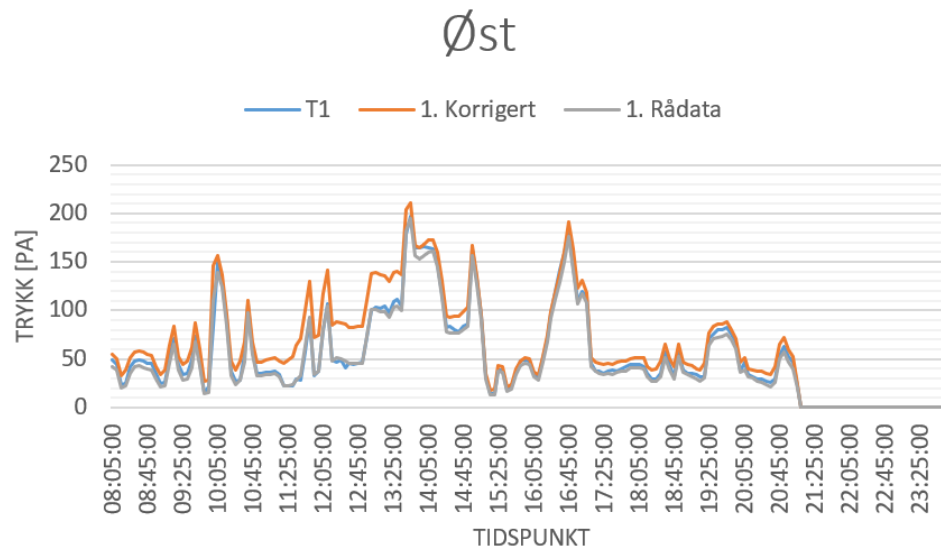
Figur 11 presenterer grafene for ventilnr. 1-10 som er plassert på østsiden av bygget. Ut fra figuren kan man se at ventilnr. 1 er den med høyest trykk og ventilnr. 10 har lavest. For ventilplasseringer lengre ut i anlegget avtar ventiltrykket. Det synliggjøres mest under endringen av belastningene fra kl.11:00 til kl.15:00. Ved de andre tidspunktene vil trykket fra alle ventilene være omtrent like. Det er tydelig at ventilene styres likt, i og med at ventiltrykkene øker og minimeres samtidig.



Figur 12: Resultat av ventiltrykk på vestsiden

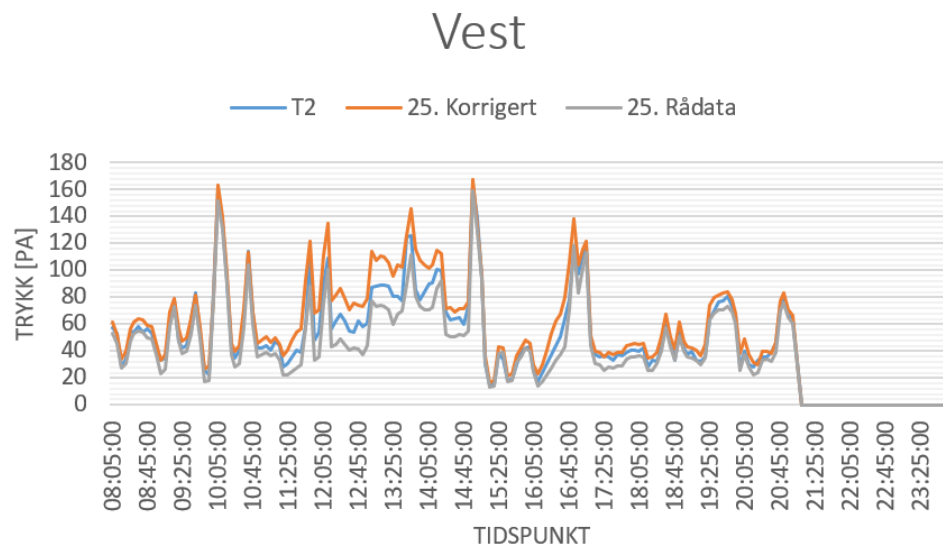
Figur 12 er tilsvarende lik figur 11, men for vestsiden av bygget (ventilnr. 16-25). Her ser man samme system at ventilnr. 25 har høyest trykk. Ventilnr. 25 er den ventilen som er nærmest aggregatet. Det som skiller mellom øst- og vestsiden er at ventilen med lavest trykk ikke er den som er lengst unna aggregatet. Ventilnr. 20 har lavest trykk under hele dagen, mens under belastningstestene kl.11:00 til kl.15:00 har også ventilnr. 24 lavt trykk.

Figur 13 og 14 viser resultatet for trykket ved reguleringsspjeldene i forhold til nærmeste ventil med korrigert trykk og rådata som er direkte hentet fra ventilen. Figurene skiller mellom øst og vest slik som i de forrige figurene (11 og 12).



Figur 13: Resultat av trykk mellom T1, korrigert og rådata på østside

Figur 13 er for trykkreguleringsspjeldet T1 som styrer ventilene på østsiden. Den nærmeste ventilen til T1 er ventilnr. 1. Ut fra figuren er grafen for rådata litt under T1, mens den korrigerte er over. Fra kl.11:00 til kl. 13:25 er det større differanse mellom den korrigerte og T1. Ved de andre tidspunktene har T1 tilsvarende like trykkverdier som rådata og korrigert. Man kan se at alle punktene følger hverandre uavhengig av kilden for trykkmålingene.

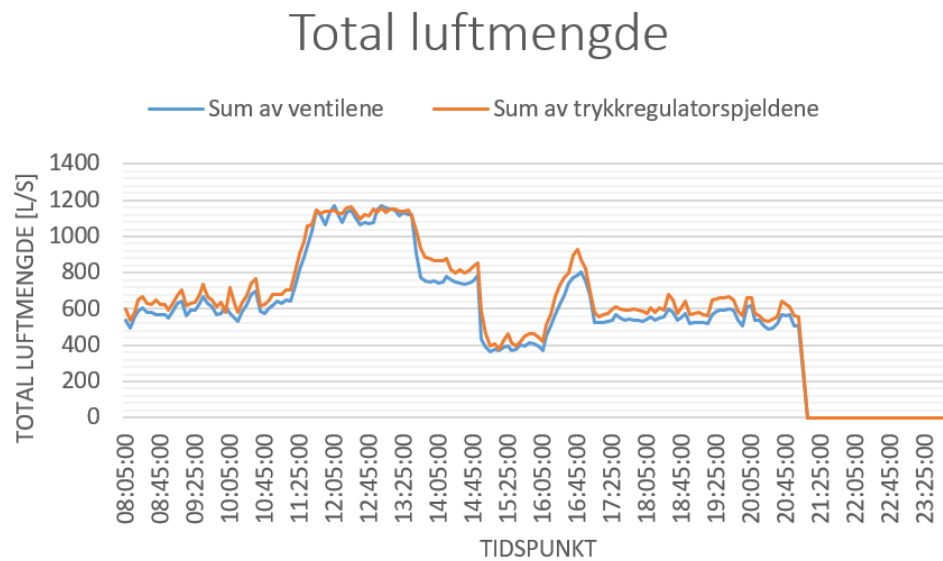


Figur 14: Resultat av trykk mellom T2, korrigert og rådata på vestside

Figur 14 har litt lavere trykk enn i figur 13. Her sammenlignes T2 med ventilnr. 25 som er nærmeste ventil. På samme måte som østsiden er det deler av dagen (kl.11:00 til kl.14:45) hvor de korrigerte verdiene har større differanse til T2. I tillegg har også rådata fra ventilen lavere verdi enn T2 ved samme tidspunkt. Det var tilsvarende like verdier for T2, korrigert og rådata ved de andre tidspunktene.

6.1.3 Total luftmengde

Total luftmengde for alle ventilene i forhold til summen av trykkregulatorspljeldene (T1 og T2) vises i figur 15. Den blå grafen viser summen av de 25 ventilene som er koblet sammen i ringledningen, mens den oransje er summen av T1 og T2.



Figur 15: Resultat av total luftmengde for ventilene og trykkregulatorspjeldene

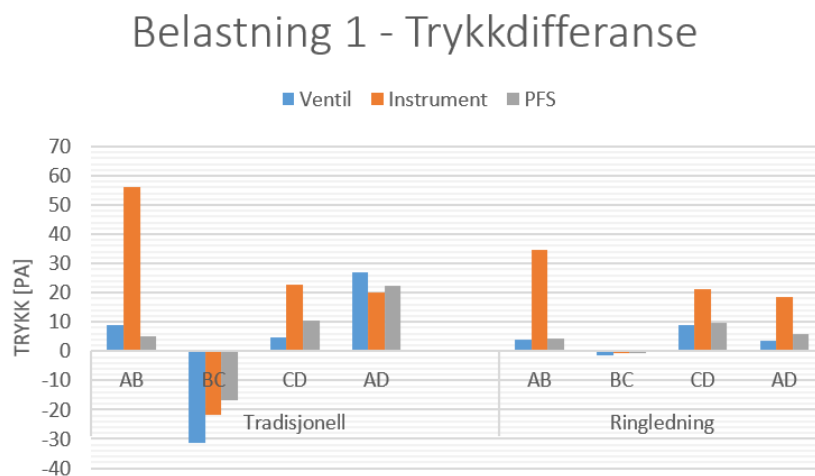
Grafen for trykkregulatorene ligger generelt over grafen for ventilene. Dette vil si at trykkregulatorspjeldene registrerer litt mer luftmengde enn summen av ventilene. Ut fra beregningene utgjør forskjellen i gjennomsnitt 11% mer luftmengde hos trykkregulatorspjeldene enn ventilene.

6.2 Kontrollmålinger og kvalitetssikring av PFS

Resultatet av kontrollmålinger og kvalitetssikring for simuleringsprogrammet PFS redegjøres nedenfor.

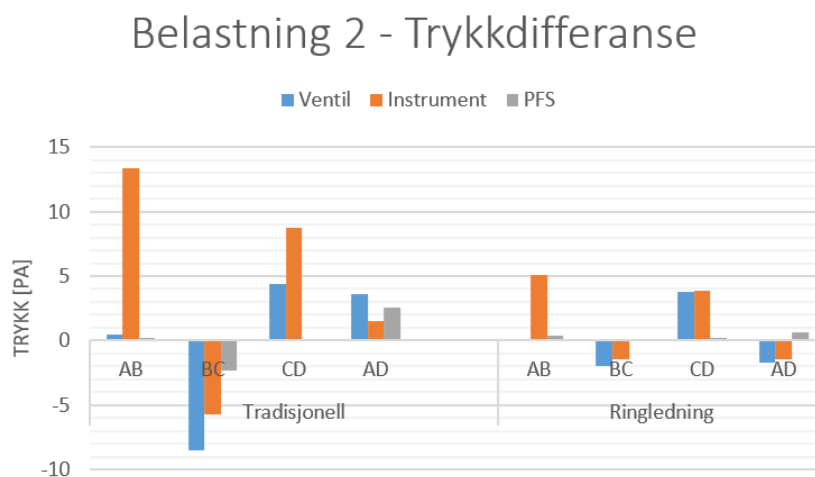
6.2.1 Trykkdifferanse

Figur 16-18 viser trykkdifferansene ved de ulike belastningsscenarioene. Det ble beregnet fra ventilene, målt med instrumenter og simulert i PFS. AB tilsvarer trykkdifferansen B-A. Tilsvarende er BC lik C-B, CD er D-C og AD er D-A.



Figur 16: Resultat av trykkdifferanse for belastning 1

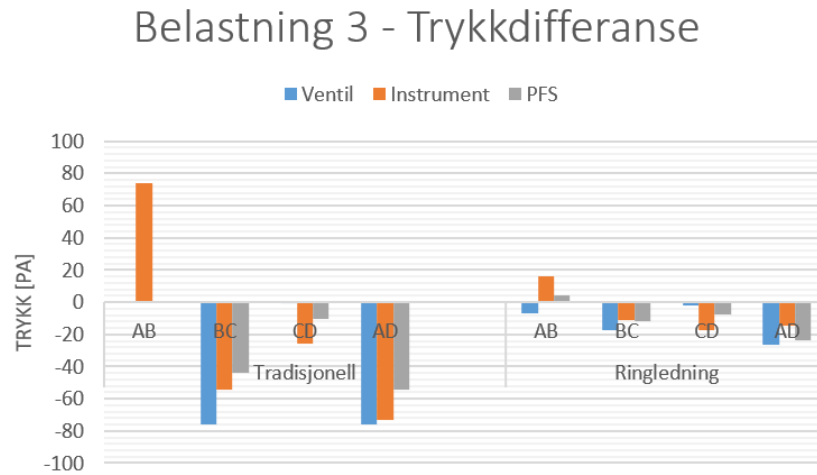
Figur 16 viser at instrumentverdien for AB er høyt i forhold til ventilene og PFS. Det er en mindre forskjell mellom instrumentverdien i BC, CD og AD. Derimot er verdien fra ventilen og PFS tilnærmet like for både tradisjonell og ringledning i alle målestrekningene. Trykkdifferansene ser ut til å være mer lik mellom ventilene og PFS enn med instrumentet.



Figur 17: Resultat av trykkdifferanse for belastning 2

Når det gjelder belastning 2 i figur 17 er skalaen i Y-aksen mye mindre enn figur 16. Derfor ser det ut som at differansen mellom ventilene og PFS er større i

belastning 2 enn ved belastning 1. Slik som i belastning 1 er det instrumentverdien som utgjør størst avvik fra de andre.



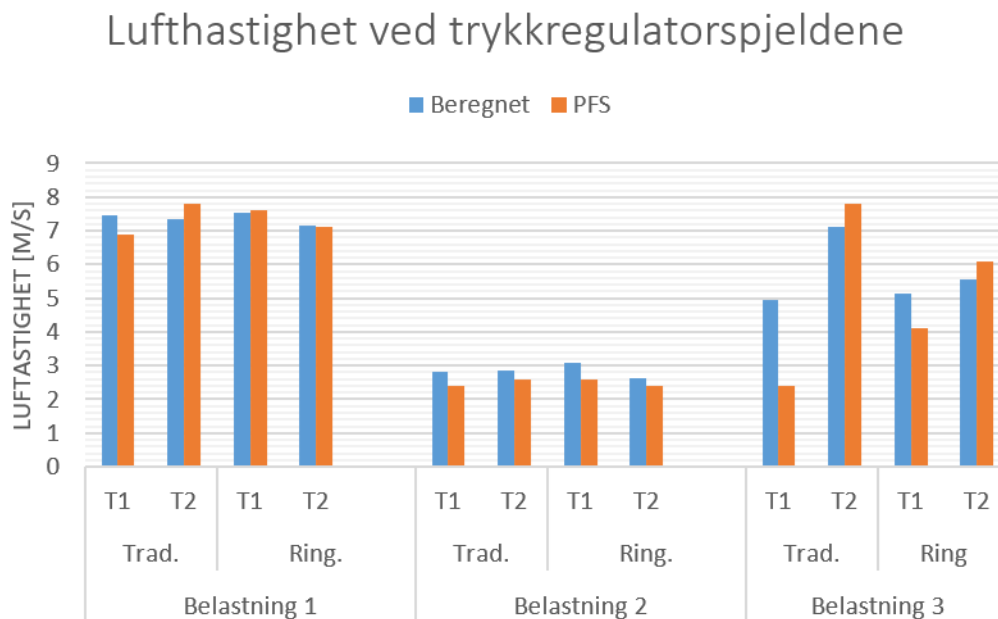
Figur 18: Resultat av trykkdifferanse for belastning 3

Figur 18 er for belastning 3. Ved tradisjonell er det AB for instrumentverdien som igjen avviker mest. Resterende av målingene er tilnærmet i samme område.

Ved undersøkelser av de tre belastningsscenarioene for casebygget er det mulig å se at PFS og ventilverdiene har tilsvarende samme verdi. Måleverdiene hentet fra instrumentet avviker tydelig iforhold til ventilene og PFS. Det er også verdt å merke seg at trykkdifferansen i de tre belastningene viser generelt lavere verdier ved bruk av ringledning, mer om trykkdifferanser blir omtalt i kapittel 6.4.

6.2.2 Lufthastighet

Resultatet av lufthastigheten ved trykkregulatorspjeldene ved beregning og simuleringen i PFS vises i figur 19. Den blå søylen representerer den beregnede verdien, ut fra luftmengden i hovedkanalen ved ventil 1 og 25. Disse punktene er tilnærmet punktet for trykkregulatoren. Den oransje søylen representerer resultatet fra PFS ved T1 og T2.

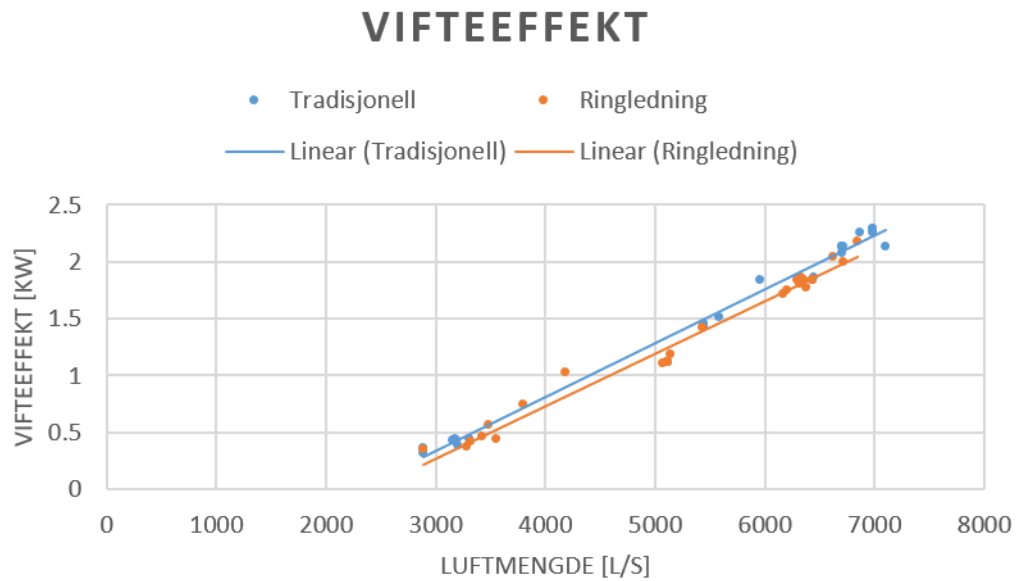


Figur 19: Resultat av total luftmengde for ventilene og trykkregulatorspjeldene

Lufthastigheten ved belastning 1 er rundt 7-8 m/s, belastning 2 er mellom 2-3 m/s og i belastning 3 varierer mellom 2-8 m/s. Ved belastning 1 og 2 befinner beregnet og PFS omtrent ved like verdier. Beregnet verdi er høyere enn PFS, utenom noen T2-verdier der PFS er høyere. Belastning 3 varierer mest mellom beregnet og PFS i sammenligning med de andre belastningene. T1 for tradisjonell er beregnet til å være 4,96 m/s, mens PFS gir 2,4 m/s. Dette er en differanse på 2,56 m/s som er en dobling av verdien gitt fra PFS. I motsetning har T2 en mye mindre differanse på 0,68 m/s mellom beregnet og PFS.

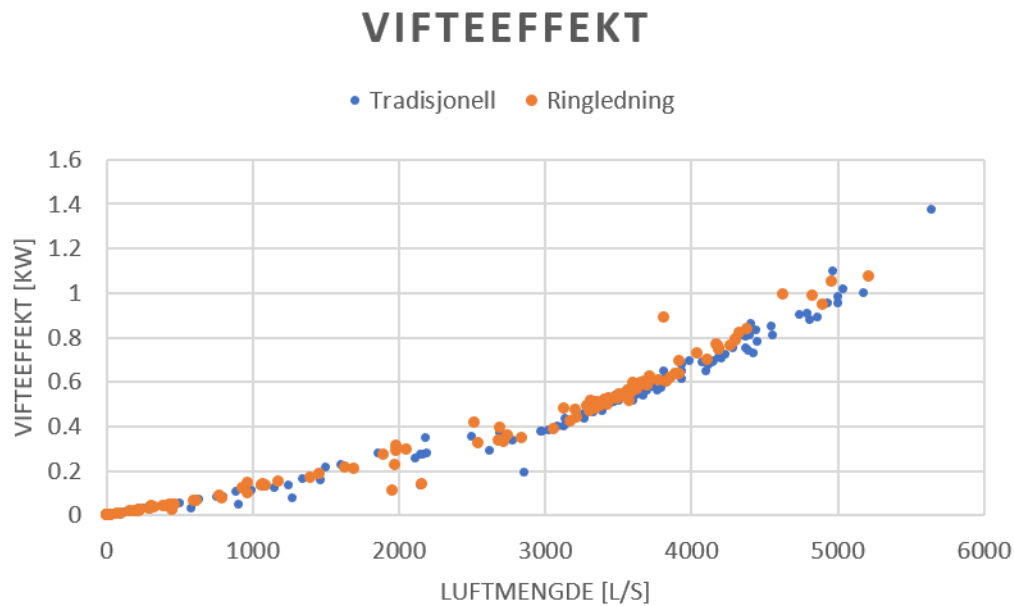
6.3 Vifteeffekt

Resultatet for vifteeffekt fremvises i figur 20 for korttidsmålingene og figur 21 for langtidsmålingene. Punktene representerer målinger som ble registrert ved ulike luftmengder som ble tilført til hele bygget.



Figur 20: Resultat av vifteeffekt for korttidsmålinger

Figur 20 viser den tradisjonelle grafen over ringledningen. Dette betyr at tradisjonell løsning bruker mer vifteeffekt under tilsvarende lik luftmengde som ringledningen. Ved beregning tilsvarende dette en økning med 2%. I punktet ved 3000 L/s bruker begge løsningene omtrent lik vifteeffekt. Desto mer luftmengde anlegget tilfører, desto større forskjell er det mellom målingene for tradisjonell og ringledning. Ved 5000-6000 L/s er de oransje punktene tydelig under de blå punktene. Det ser også ut som når luftmengden nærmer seg 7000 L/s vil tradisjonell- og ringledningpunktene samle seg på omtrent det samme vifteeffektnivået.



Figur 21: Resultat av vifteeffekt for langtidsmålinger

For langtidsmålingene (fig. 21) gir begge løsningene lik grunnlinje. Det er ingen forskjeller, utenom enkelte punkter. Noen tradisjonelle målinger ligger lavere enn for ringledningen. Det er også flere blå punkter ved høyere luftmengde.

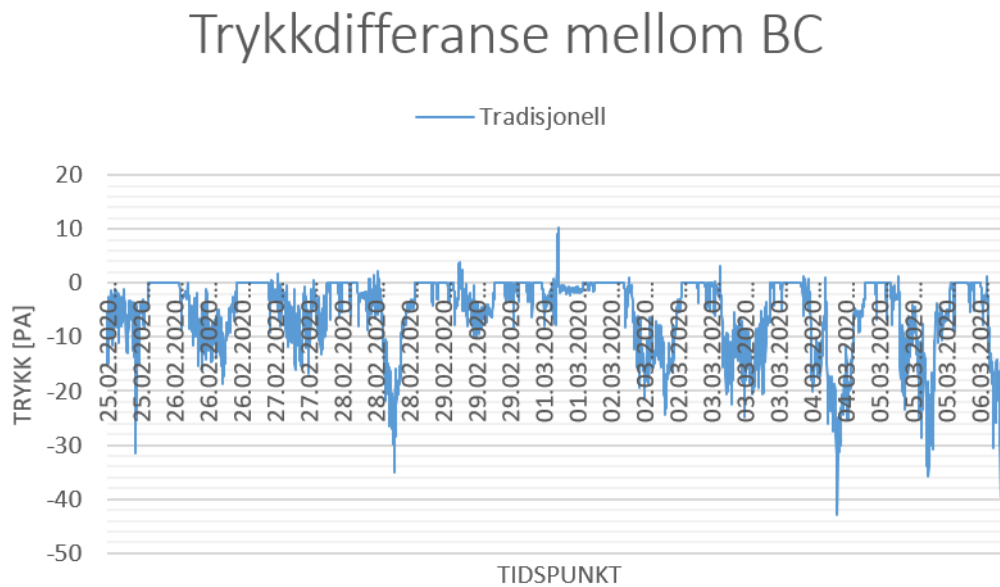
6.3.1 Paret T-Test

Nullhypotesen er at differansen mellom gjennomsnittsverdien til vifteeffekten for ringledningen og tradisjonell løsning er null. T-Testen av korttidsmålingene for vifteeffekt ga en P-verdi på 0,000257, se vedlegg A. Her brukes også verdien "one-tail", fordi vi vet at ringledningen har lavere verdi enn tradisjonell ut fra figur 20. Testen viser en signifikans på 99,9742%. Dette betyr at det er en forskjell mellom vifteeffekten under korttidsmålingene for tradisjonell og ringledning.

6.4 Trykkdifferanse for langtidsmålinger

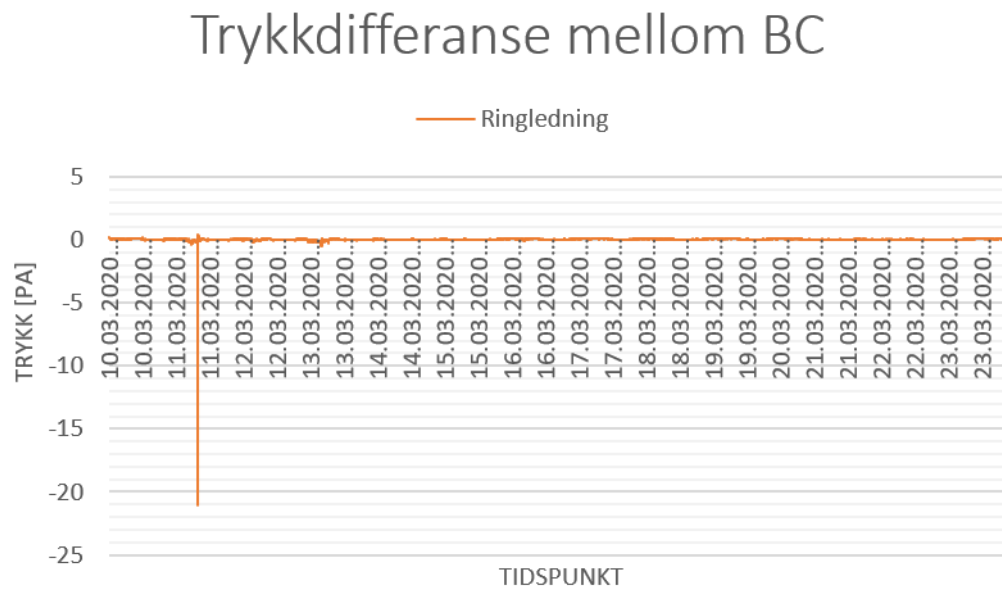
Resultatet av trykkdifferansen for korttidsmålingene ble vist kapittel 6.2 for kontroll av PFS. I tillegg til kontrollen viser også trykkdifferansen for ringledning for de tre belastningene samme trend. Ved bruk av ringledning vil trykkdifferansen være lavere enn ved tradisjonell.

Trykkdifferansen for langtidsmålingene mellom enden av kanalen i to uker hver vises i figur 22 og 23. Y-aksen viser trykkdifferansen mellom BC, mens x-aksen viser dato for målingene.



Figur 22: Resultat av trykkdifferanse mellom BC i tradisjonell

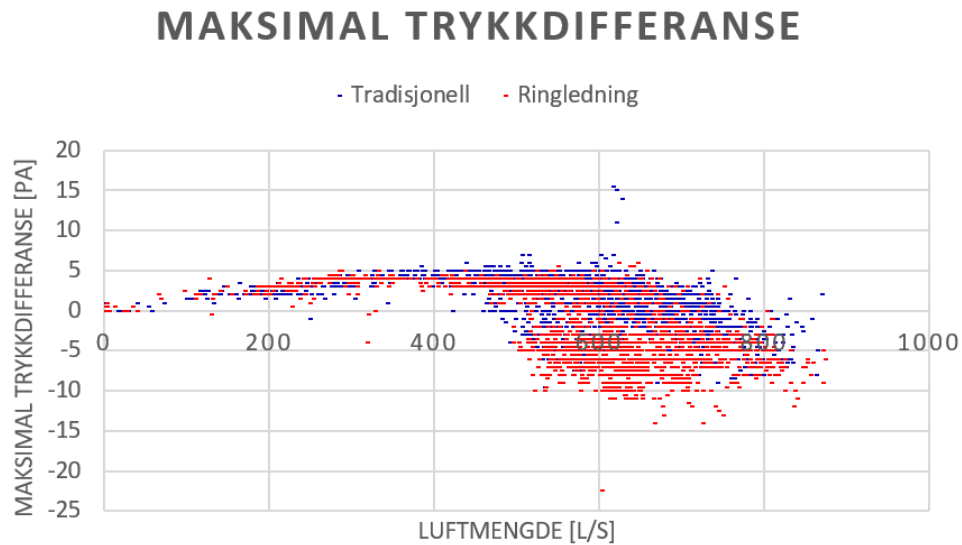
Figur 22 viser endringen av trykket mellom øst og vestsiden av kanalene når stengespjeldet (S2) var stengt. Her viser den vekslning i trykket ved perioden. Den 29.01 og 01.03 er en helg og det er derfor lavere trykkdifferanser. Den laveste verdien er under -40 Pa som vil si at det var 40 Pa mer trykk på østsiden enn vest.



Figur 23: Resultat av trykkdifferanse mellom BC i ringledning

Figur 23 er tilsvarende figur 22, men for ringledning. I motsetning til den tradisjonelle løsningen er det mer stabilt. Det er kun ett punkt som er under -20 Pa, men resterende verdier under langtidsmålingene er tilsvarende 0 Pa. Dette betyr at systemet er balansert ved normalbruk med ringledning.

Resultatet av langtidsmålingene for maksimal trykkdifferanse i forhold til den totale luftmengden vises i figur 24. X-aksen er summen av luftmengden gjennom T1 og T2. Y-aksen viser den maksimale trykkdifferansen mellom øst- og vestsiden med polaritet. Negative verdier betyr at trykket er høyere ved enden av kanalen enn ved starten.



Figur 24: Resultat av maksimal trykkdifferanse øst/vest

De blå punktene er verdier for tradisjonell, mens de røde er for ringledning. Fra 400 L/s er de blå punktene over de røde. Dette gir en indikasjon på at det vil være høyere trykk ved bruk av tradisjonell system.

6.4.1 Paret T-Test

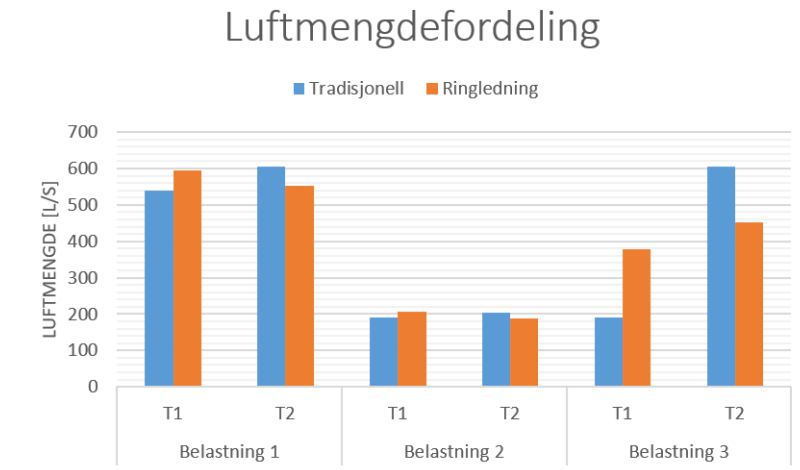
Nullhypotesen er tilsvarende lik som for korttidmålingene av vifteeffekten, men for maksimal trykkdifferanse. Her brukes også P-verdien for "one-tail" fordi vi vet at ringledning vil ha lavere trykk enn tradisjonell ut fra figur 24. Dataene deles opp fra 400 L/s i hundredels luftmengder til 800 L/s. Resultatet vises i vedlegg B. Det er totalt utført fem T-Tester. Alle testene viste P-verdier nærmere null. Den laveste P-verdien er $1,7E-164$ for 600-699,9 L/s. Dette tilsier en veldig høy signifikans nivå på omtrent 100%.

6.5 PFS simulering

Ved bruk av PFS simulering er det utarbeidet resultater i form av luftmengde, trykkfall og undersøkelse av hvordan økningen av kanaldimensjonen påvirker designet av ventilasjonsanlegget på casebygget.

6.5.1 Luftmengde

Luftmengdefordelingen i kanalene mellom øst og vest vises i figur 25. Y-aksen viser den totale luftmengden som registreres for hver av sidene.

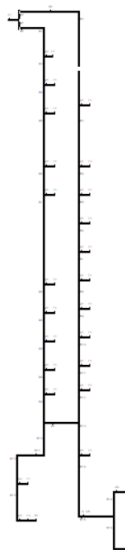


Figur 25: PFS - Luftmengdefordeling

I belastning 1 og 2 er luftmengden mellom tradisjonell og ringledning tilsvarende samme nivå. Det som utgjør en forskjell er belastning 3. Den har en lav luftmengde på øst og høyere på vest. Det er en differanse mellom T1 og T2 for tradisjonell på 415 L/s, mens på ringledning er det 76 L/s. Det vil si at ringledningen fordeler luftmengden mer jevnt, dersom det er større luftmengdebehov fra den ene siden.

6.5.2 Trykkfall

For fullverdig resultat av trykkfallberegningen, se vedlegg C. Den grafiske koden for ringledningen på casebygget ble fremstilt i PFS slik:



Figur 26: PFS - Grafisk kode for ringledningen på casebygget.

Som nevnt tidligere i kapittel 5.3.3, vil anlegget være speilvendt og vertikalt i programmet. Vest er på høyreside av den grafiske koden, mens øst er på venstreside. I vedlegg C ser man at luftstrømningen i sammenkoblingen ved dimensjonerende tilstand beveger seg i retning mot høyre. Dette er på grunn av høyere luftmengdebehov på høyreside i forhold til venstreside.

Systemdesign	Total trykkfall [Pa]
Ringledning	143,4
Tradisjonell vest	171,0
Tradisjonell øst	121,7

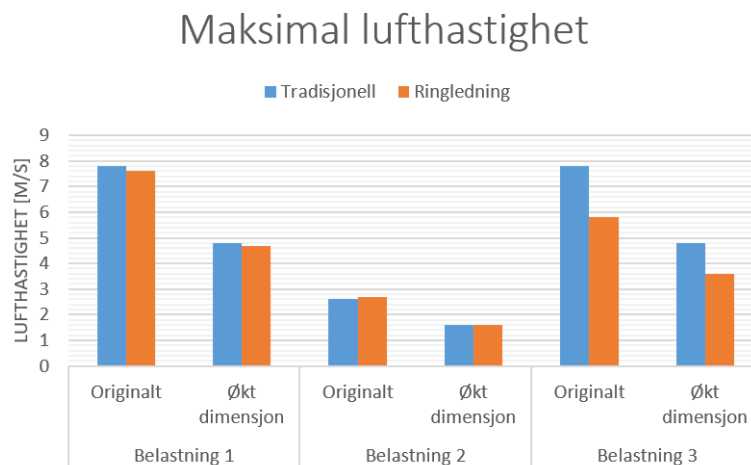
Tabell 10: Resultat av trykkfall fra PFS

Resultatet av simuleringen for trykkfallet på ringledningen ble 143,4 Pa, se vedlegg C for hele koden. Trykkfallet på vest med det lengste kanalstrekket ble 171 Pa, mens andre siden ble 121,7 Pa. Tabell 10 viser resultatet av total trykkfall. Mellom ringledning og tradisjonell vest er det en differanse på 27,6 Pa. Derimot har østsiden lavere trykkfall enn ringledningen.

6.5.3 Økning av kanaldimensjon

Kanalene ble det simulert med økning av én kanaldimensjon for de ulike belastningsscenarioene. Påvirkningen av kanaldimensjoneringen er lufthastighet i kanal, trykktapsgradient og trykk.

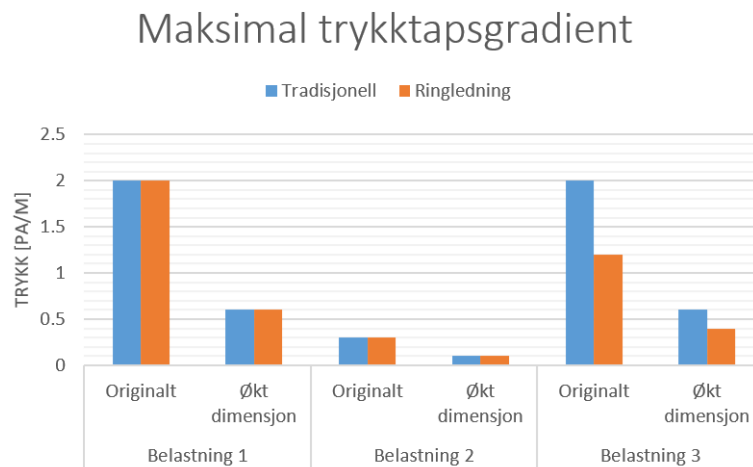
Lufthastigheten på starten av kanalen i simuleringen vises i figur 27. Originalt er den dimensjonerte kanaldimensjonen på casebygget.



Figur 27: PFS - Resultat av maksimal lufthastighet.

Figur 27 er lufthastigheten enten på øst eller vest avhengig av hvilken side som har størst verdi. Forskjellen mellom tradisjonell og ringledning er lite i de to første belastningene. Alle utenom belastning 2 originalt har ringledning en litt høyere verdi enn tradisjonell. Dette viser at bruken av ringledning gir lavere lufthastighet i kanalen enn tradisjonell. Ved sammenligning mellom originalt og økt dimensjon i belastning 1 er det omtrent 40% reduksjon av lufthastighet. I belastning 1 og 3 originalt er lufthastigheten i kanalen nærmere 8 m/s. Forskjellen er størst i belastning 3 hvor bruken av ringledning med originaldimensjon fører til en reduksjon av maksimal lufthastighet med omtrent 2 m/s.

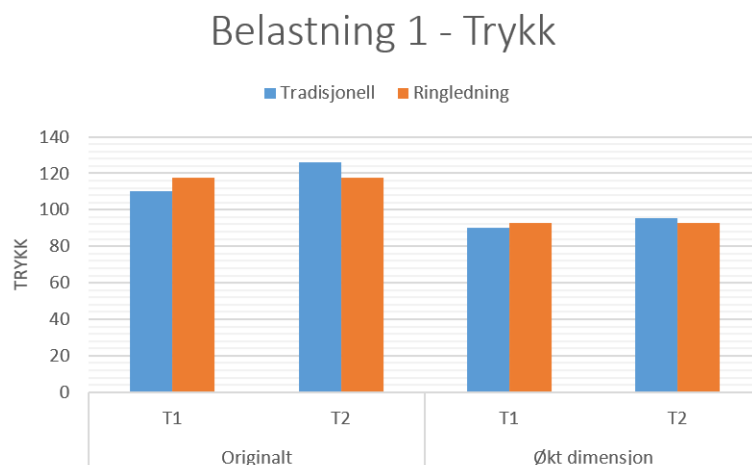
Resultatet for maksimal trykktapsgradienten vises i figuren under.



Figur 28: PFS - Resultat av trykktapsgradient.

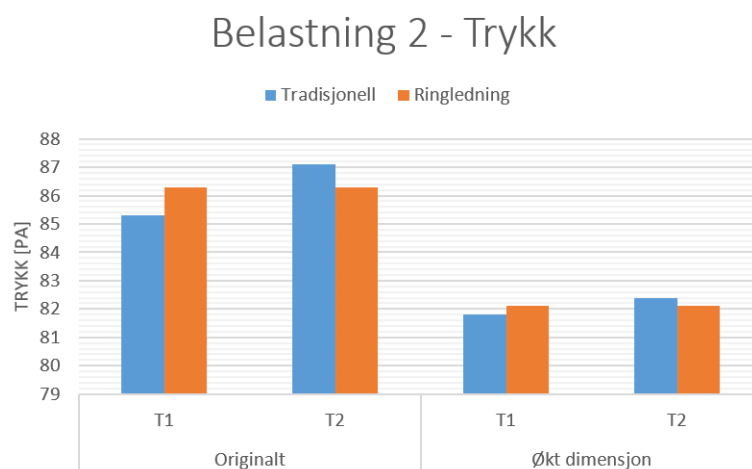
Figur 28 viser at trykktapsgradienten mellom tradisjonell og ringledning er størst i belastning 3. Belastning 1 originalt og belastning 3 tradisjonell er trykktapsgradienten 2 Pa/m. Ved å øke kanaldimensjonen vil trykktapsgradienten reduseres med nesten 70% for belastning 1.

Figur 29-31 viser resultatet for trykket ved starten av kanalen for belastning 1-3. Trykket for ringledningen ble hentet fra ett samlet punkt for begge sidene, mens for tradisjonell var det fra T1 og T2.



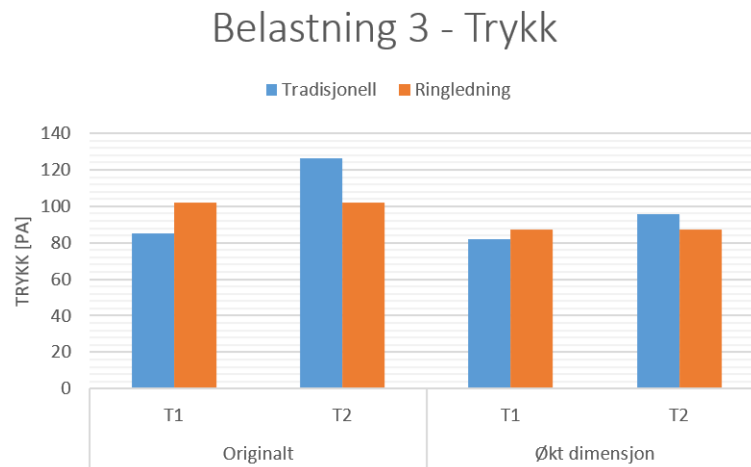
Figur 29: PFS - Resultat av trykk i T1 og T2 ved belastning 1.

Figur 29 er trykket for belastning 1. Det er en 20% reduksjon ved å øke kanal-dimensjonen. Differansen mellom trykket på tradisjonell blir mindre ved økning av dimensjon.



Figur 30: PFS - Resultat av trykk i T1 og T2 ved belastning 2.

Figur 30 viser trykket for belastning 2. Selv om det ser ut til å være større differanser i forhold til figur 29 er skalaen for Y-aksen mindre. En beregning av differanse gir en reduksjon på 4% i trykk ved økning av dimensjon. Dette er mye mindre enn belastning 1.



Figur 31: Resultat av trykk i T1 og T2 ved belastning 3.

Resultatet for belastning 3 (fig. 31) gir omtrent 15% reduksjon i trykk ved økning av dimensjon. Tilsvarende som de andre belastningene er trykket for ringledningen en verdi mellom T1 og T2 ved tradisjonell. Dette tilsier at ringledningen fordeler trykket jevnere mellom hver av sidene. Differansen mellom trykket fra T2 originalt for tradisjonell og ringledning er størst ved belastning 3.

7 Diskusjon

Videre diskuteres resultatet med fokus på forskjellen ved bruk av ringledning i forhold til tradisjonell ventilasjonssystem.

7.1 Trykkmålinger

Målepunkter for trykkmålingene ble valgt der det var mest hensiktsmessig. Målepunktene burde vært plassert 1,575m oppstrøms og 0,63m nedstrøms (kapittel 4.1), men på grunn av mange bend og korte kanaler var det ikke mulig. Dette gjelder mest for målepunktene B og C. A og D ble valgt ut fra plasseringen av trykkreguleringsspjeldene.

Under korttidsmålingene avventet det en stund mellom hver belastningsscenario før målingen av trykk. Det ble kontrollert visuelt til verdiene stabiliserte seg uten noen tidsmålinger. Det virket som luftmengden var stabil, men dataene indikerte at enkelte verdier var registrert under ustabile forhold. De første registrerte verdiene er høyere enn resterende verdier innenfor målingen. Dette indikerer på at målingen kan ha vært registrert i overgangen mellom belastningene.

For langtidsmålingene burde bygget vært i normaldrift. Driftstiden ble endret midt i måleperiodene. I den første perioden er driftstiden på hverdager fra kl.05:30 til kl.21:00 og helgen fra kl.07:30 til kl.18:30. Driftstiden ble endret 6. Mars 2020, til henholdsvis hverdager fra kl.05:30 til kl.17:30 og helgen fra kl.09:00 til kl.12:00. Ettersom skolen ble stengt i midten av mars grunnet COVID-19, ble bygget begrenset til maksimum fem personer ved enhver tid. Dette vil være med på å påvirke dataene fra målingene.

De første 2 ukene for langtidsmålingen av tradisjonell løsning sluttet Swema300md instrumentet å logge etter 10 dager. Ved samme dag ble driftstiden endret og det er mulig det kan ha påvirket innstillingene til instrumentet. Den nøyaktig årsaken er ukjent, men det gir færre trykkdifferansemålinger for tradisjonell enn for ringledningen. I andre måleperiode for ringledning var hele perioden i redusert driftstid. Dette medfører mindre belastning, mindre variasjoner på forbruket og målingene holder derfor omtrent samme nivå.

7.2 Kontrollmålinger og kvalitetssikring

Det er ikke mulig å kontrollere og kvalitetssikre alle faktorene for systemet eller programmet innenfor tidsrammen til oppgaven. Det er derfor undersøkt noen

faktorer og deretter antas det at de andre faktorene også er god nok til videre bruk.

7.2.1 Lindinspect

Den målte tilluftstemperaturen differerte litt fra det aggregatet hadde registrert. Dette kan være på grunn av avlesningsfeil. Verdien fra termometeret varierte hele tiden. Det ble derfor avlest en verdi som var omtrent i samme område. Resultatet viser derfor verdien registrert kl.10:00 og 10:05 fordi den avleste verdien kan være mellom det tidspunktet. Selv om verdiene avviker noe fra hverandre, er det ikke store forskjeller. Det er derfor mulig å stole på de registrerte verdiene.

Trykkmålingene målt ved T1 av DPM og registrert fra Lindinspect viser tilsvarende verdier. Det forventes at det vil være litt avvik mellom målt og registrert på grunn av bruken av forskjellige sensorer. Likevel følger DPM nedgangen i trykket slik som Lindinspect. På bakgrunn av resultatet kan man regne med at verdiene fra Lindinspect er korrekte.

I forhold til figur 11 og 12 forventes det at ventilene nærmest aggregatet har høyest trykk. Det forventes at trykket avtar desto lenger ut i anlegget ventilene er. Forventningene tilfredstilles på østsiden av anlegget. Derimot avviker vestsiden. Det burde vært ventilnr. 25 som skulle hatt lavest trykk, men det var ventilnr. 20 og 24. Ventilnr. 24 er plassert i et møterom, mens ventilnr. 20 er et kontor. Årsaken til at det er lavt trykk i de ventilene kan være luftmengdebehovet. Det er kun kontoret som har lavere trykk enn de andre rommene gjennom hele dagen. Dette er på grunn av at kontoret har lavest luftmengdebehov. Møterommet har lavt trykk under en periode på dagen. Dette kommer av at møterommet er satt til maksimal luftmengdebehov som er større enn naborommene. Møterommet er et av de største rommene som er nærmest aggregatet. Ventilene vil derfor være helt åpne for å sikre luftmengdebehovet som fører til et lavere trykk. Dersom alle ventilene i ringledning er satt til lik luftmengde ville det gitt trykkverdier slik som forventningene.

Trykket mellom trykkreguleringsspjeldet, korrigeret trykk for kanalen og ventilens rådata viser liten forskjell. Derimot er det større differanse mellom den korrigerte og T1 ved tidspunktet for belastning 1. For vestsiden er det større differanse mellom de tre verdiene ved belastning 1 og 3. Utenom de tidene vil de tre målingene være tilnærmet like. Differansen er ikke veldig stor til at det påvirker resultatene, dersom man tilfeldig bruker en av verdiene. Det bør også legges merke til at avstanden mellom ventilnr.1 og T1 er mindre enn avstanden mellom ventilnr.25 og T2. Dette betyr at ventilnr.1 vil være mer lik T1 enn ventilnr. 25 og T2.

Når det gjelder total luftmengde, viste verdiene lite forskjell mellom summen av ventilene i forhold til trykkregulatorspjeldene. Dette viser at systemet gir tilnærmet like verdier, selv ved bruk av andre sensorer. Siden det er lite forskjell mellom total luftmengde i ringledningen, vil det ikke ha stor betydning for hvilken man bruker.

Både kontrollmålinger for trykk og tilluftstemperatur, samt kvalitetssikring av trykk og luftmengde, gis det inntrykk at Lindinspect registrerer riktige verdier. Det er ikke undersøkt for alle faktorene fra Lindinspect, men det er gjort ut fra det som brukes videre.

7.2.2 PFS

Mellom de ulike belastningene for trykkdifferanse gir instrumentet avvikende måling for målepunktet AB. Det er vanskelig å si nøyaktig hva som har påvirket målingen. Ut fra ventil og PFS er instrumentverdien oftest avvikelnde fra de andre. Det kan ha vært målefeil som har slått ut på verdien. Det bør ses bort ifra målingene fra instrumentet i dette tilfellet, siden det gir merkelige verdier. Trykkdifferanse fra ventil og PFS, indikerer at PFS ikke er langt fra den reelle verdien på ringledningen. Verdien mellom dem er varierende, men de er omtrent i samme område. Dette kan også skyldes at belastningstestene ikke var stabile under måledagen. Ut fra de ulike belastningstestene virker det som at PFS klarer å håndtere beregningene. Differansen er størst mellom ventil og PFS ved beregning av tradisjonell løsning. Det kan forklares av ustabile forhold eller varierende luftmengde på grunn av utett stengespjeld.

Lufthastigheten i PFS ble sammenlignet med beregninger (fig.19). Det tas ikke direkte målinger for lufthastighet i kanalen fordi det kan gi stor måleusikkerhet. Det er derfor mer nøyaktig å bruke beregninger og simuleringer. Lufthastigheten for belastning 1 og 2 viser omtrent de samme verdiene for beregningen og PFS. Belastning 3 gir derimot større forskjeller. Dette kan skyldes at anlegget ikke hadde stabilisert seg under belastningsendringene. Det tyder også på at PFS muligens har mer vanskeligheter å beregne 50/50 belastningen. I tillegg er differansen mellom T1 og T2 ved tradisjonell litt større enn for ringledningen. Dette betyr at bruken av ringledning vil kunne redusere den maksimale lufthastigheten, men det er snakk om noen desimaler og vil ikke ha en betydelig effekt.

7.3 Trykkdifferanse

For trykkdifferanse ved belastningene (fig. 16-18) er hovedsaklig ringledningens trykkdifferanse lavere enn hos tradisjonell. Det har vært inntrykk om at ringledninger gir lavere trykk enn tradisjonell og dette forsterker det.

Trykkdifferanse mellom BC for tradisjonell (fig. 22) har færre målinger fordi instrumentet stoppet opp iløpet av måleperioden, se kapittel 7.1. Tradisjonell viser at trykket variere betydelig mellom sidene av anlegget. For ringledning (fig. 23) vil trykkdifferansen mellom BC være for det meste null. Dette betyr at nullpunktet er akkurat ved sammenkoblingen og systemet er balansert. Det vil ikke være store forskjeller på belastningen mellom øst og vest siden.

For maksimal trykkdifferanse (fig. 24) er fremstilt slik at den utelukker utetemperaturforskjeller som kan påvirke resultatet. Fra 400 L/s er det høyere trykk ved bruk av tradisjonell løsning. Ved lave luftmengder vil det ikke ha stor betydning. Det er mulig at større luftmengder gir større ubalanse mellom øst og vest. Dette fører til at tradisjonell løsning må ha høyere trykk for å tilfredsstille behovet. Dette viser også at ringledninger har lavere trykk som betyr lavere vifteeffekt.

7.4 Simulering av casebygg

Simuleringen av luftmengdefordelingen på hver side av ringledningen i belastning 1 og 2 er omtrent lik som for tradisjonell (fig. 25). Ved belastning 3 utgjør ringledningen en større endring. Det forventes ved tradisjonell løsning at T1 og T2 har stor differanse på grunn av belastningsscenario 3. Ved bruk av ringledning i belastning 3 tydeliggjøres fordelingen med å bruke denne løsningen. Ringledningen vil fordele luftmengden mer jevnt på begge sider ved å utnytte sammenkoblingen. Dette gjør at det blir mindre belastning på vestsiden som medfører lavere maksimal trykk.

Trykkfallet viser at ringledningen har et lavere trykkfall enn tradisjonell. Dersom man beregner systemet som et to-grenet tradisjonelt anlegg vil det gi et høyere trykkfall. Dette skyldes trolig luftmengdefordelingen som ble nevnt over. I PFS måtte hver side beregnes enkeltvis for den tradisjonelle løsningen. Dersom man beregner det samlet vil resultatet være på betingelse av hvor den bestemmende ventilen er plassert. Siden aggregatet styres etter det høyeste trykket i anlegget, er man interessert i å få redusert det totale trykkfallet.

7.4.1 Økning av kanaldimensjon

Sammenligningen mellom original og økt kanaldimensjon gir indikasjon på forskjellen mellom ringledning og tradisjonell. Original dimensjonen på casebygget viste høye verdier. Derfor ble det valgt å simulere en økning av kanaldimensjonen fordi det vil gi lavere verdier. En økning av kanaldimensjonen vil i realitet ta opp mer plass dersom det ikke er nødvendig.

Lufthastighet: Anbefalt lufthastighet i 315mm hovedkanal er 5-6 m/s [17]. Under belastning 1 og belastning 3 for originaldimensjonen er verdien over nivået. Dette vil trolig gi mer støy i de nærmeste rommene til aggregatet. Ved å øke en dimensjon i hele anlegget reduseres verdien. Casebygget er et skole-/kontorbygg og derfor er det mulig at det er antatt at bygget sjeldent vil ha 100% samtidighet. Der aksepteres derfor høyere lufthastighet ved maksimal belastning. Det er liten forskjell mellom tradisjonell og ringledning for både belastning 1 og 2. I belastning 2 for originaldimensjon er lufthastigheten for ringledning litt høyere enn tradisjonell. Dette kan komme av at den maksimale verdien er avlest på forskjellige sider av anlegget. Den maksimale lufthastigheten er enten ved T1 eller T2. Det er størst forskjell i belastning 3 mellom tradisjonell og ringledning. Økningen av kanaldimensjonen vil ikke gi større forskjell mellom løsningene, men vil som forventet redusere lufthastigheten.

Trykktapsgradient: I likhet med lufthastighet har trykktapsgradienten også oversteget den anbefalte verdien på 1 Pa/m [17]. Det bør merkes at det er høyere verdi kun på starten av kanalen. Trykktapsgradienten blir lavere utover anlegget. For belastning 1 og 2 er det ingen betydelige endringer mellom ringledning og tradisjonell. Bruken av ringledning gir størst reduksjon av trykktapsgradient for belastning 3 originalt. Økning av kanaldimensjon vil dermed føre til mindre forskjell mellom løsningene for belastning 3. Tilsvarende lufthastighet forventes det sjeldent maksimal belastning for dette bygget. Det er derfor mulig å akseptere høyere verdi.

Trykk: Trykket for de tre belastningene viser samme trend. Økning av kanaldimensjonen fører til at trykkreduksjonen mellom bruken av tradisjonell og ringledning blir mindre. Det er heller ingen stor forskjell for den originale dimensjonen. Trykket for ringledningen ligger omtrent midt mellom T1 og T2 for tradisjonell. Dette vil si at den maksimale trykket for ringledningen vil være lavere enn for tradisjonell. Tilsvarende alle andre resultater er det belastning 3 som utgjør størst forskjell.

7.5 Besparelser

Besparelser er i form av kostnader man kan redusere uten å påvirke behovet. Det er fokusert på vifteeffekt, trykk, plassbesparelse og monteringskostnader. Lavere trykk gir lavere vifteeffekt. Lavere vifteeffekt fører til mindre bruk av elektrisitet. Ved riktig designvalg kan man også spare plass og materialbruk. I tillegg er bruken av et enklere ventilasjonssystem kan også redusere monteringskostnader.

7.5.1 Vifteeffekt

Vifteeffekten for korttidsmålingen viser en forskjell mellom tradisjonell og ringledning (fig. 20). Desto lavere vifteeffekt desto mer besparelse. Selv om vifteeffekten er lavere ved bruk av ringledning er det lite. Hvis man ser på antall målepunkter er få punkter mellom 3000-5000 L/s for det tradisjonelle anlegget. Dette skyldes høyere luftmengdebehov i resten av bygget. Det forventes at vifteeffekten er lik for begge løsningene ved belastning 1 og 2, på grunn av symmetri og nøytral nullpunkt. Ut fra resultatet samler målepunktene seg ved 3000 L/s og 7000L/s. Det er grunn til å tro at forskjellen mellom tradisjonell og ringledning utgjøres av målepunktene med middels luftmengdebehov. Disse målingene er trolig registrert ved belastning 3. Derfor er det mulig det vil være større besparelse ved et mer ubalansert luftmengdebehov. Dette er også grunnen til at vifteeffekten for langtidsmålingene (fig. 21) ikke viser noen forskjell.

Trykkdifferansen mellom BC for ringledning (fig. 23) viser et balansert system. Ved å se på langtidsmålingene er det ingen besparelse av vifteeffekt ved normalbruk. Dette kan være at besparelsen inntreffer ved lignende belastninger som belastning 3. Vifteeffekten påvirkes av det høyeste trykket i anlegget. Ut fra resultatet for maksimal trykkdifferanse er det tydelig forskjell mellom tradisjonell og ringledning. Disse målingene er tatt under samme periode som vifteeffekten. Det forventes derfor at vifteeffekten også skal være lavere for ringledning. Vifteeffekten kan ha blitt påvirket av høyere trykk i andre deler av bygget enn i ringledningen.

7.5.2 Plassbesparelse

Det som utgjør en forskjell på plassbesparelse er kanaldimensjon og antall kanalgrener. Ved bruk av ringledning brukes en fast dimensjon for hele hovedkanalen. For tradisjonell vil dimensjonen variere ettersom luftmengden i kanalen reduseres. Ut fra designvalget for tradisjonell løsning vil dimensjonen variere. Et grunnleggende tradisjonelt system vil ha større hovedkanal enn et to-grenet. En ringledning vil også føre til mindre grenkanaler fordi man kan lettere hente luft fra hovedkanalen.

Dette vil gi mer plass i himlingen. For casebygget er det ingen plassbesparelse ved å velge den ene eller den andre løsningen. Dette skyldes at skillet mellom ringledning og tradisjonell er stengespjeldet S2 åpent/stengt. Dersom man sammenligner designløsningen til et grunnleggende tradisjonelt system, vil man derimot få mer plass ved å velge ringledning. For ringledningen vil det også være en ekstra sammenkobling, men den er såpass liten til at det ikke vil ha stor betydning for plass.

7.5.3 Material- og monteringskostnader

For materialkostnader er det sammenkoblingen i casebygget som vil utgjøre en forskjell. Denne er omtrent 1,1m som ikke gir mye ekstra metallbruk. Dersom man sammenligner med andre tradisjonelle løsninger, vil nedtrapping av kanaldimensjonen føre til mindre materialer. Når det gjelder montering vil ringledninger være enklere på grunn av konstant hovedkanaldimensjon. Dette gjør det enklere for montøren fordi det blir mindre koblinger og avkappinger. Arbeidet vil gå raskere og det vil kreve færre personer tilstede. Sammenkoblingen er det ekstra leddet som må monteres i en ringledning imotsetning til et tradisjonelt anlegg. Denne sammekoblingen er kort og vil ikke gi store forskjeller både for material- og monteringskostnader.

7.6 Kanaldimensjonering

Ut fra resultatene for trykk, lufthastighet og vifteeffekt er det liten forskjell mellom tradisjonell og ringledning. Det er derfor ingen grunn til å foreslå nye retningslinjer for dimensjonering av ringledning. Det er valgt å beholde de generelle dimensjoneringskriteriene som er satt for tradisjonelle ventilasjonsanlegg. De generelle dimensjoneringskriteriene gjelder for luftmengde, lufthastighet, trykktapsgradient og støy.

For at bedrifter skal kunne dimensjonere ringledninger bør det brukes et program som er lett tilgjengelig. Det er derfor laget en veiledning for bruk av MagiCAD ved dimensjonering av ringledning i ventilasjon, se vedlegg D. Dersom man ønsker å kvalitetssikre beregningene fra MagiCAD kan programmet PFS benyttes. For å bruke PFS for kanaldimensjonering, er det mye å nytt å sette seg inn i. I tillegg må programmet anskaffes og kan belaste bedriften unødvendige kostnader dersom det ikke brukes riktig. Det er derfor laget en veiledning for PFS i vedlegg E, slik at man kan kopiere koden og prøve selv.

8 Konklusjon

Ut fra målingene og simuleringene viser resultatet at ringledning har sine fordeler. Kontrollmålingene og kvalitetssikringen bekrefter at SD-anlegget samt PFS kan brukes for dokumentasjon.

Trykkdifferansen mellom målepunktene for belastningsscenarioene er generelt lavere for ringledning enn tradisjonell. Målingen av trykkdifferanse mellom BC viser at ringledningen er et balansert system imotsetning til tradisjonell. Resultatet for maksimal trykkdifferanse er lavere for ringledning fra og med 400 L/s. Ved utføring av paret T-test bekreftes forskjellen mellom de to datasettene. PFS simuleringen gir et lavere total trykkfall for hele ringledningen enn tradisjonell. I tillegg viser simuleringen for originaldimensjon og økning av kanaldimensjon nesten ingen forskjell for trykktapsgradient i belastning 1 og 2. Den største forskjellen er ved belastning 3.

For lufthastighet i kanalen er det tilnærmet lik trend som trykktapsgradient. Belastning 1 og 2 viser liten forskjell, mens belastning 3 viser større forskjell mellom ringledning og tradisjonell.

Vifteeffekten er lavere med 2% for korttidsmålingene for ringledning. Ut fra resultatet er det grunn til å tro at dette gjelder ved ubalansert belastning. Langtidsmålingene viser ingen forskjell i vifteeffekt. Derimot motbeviser resultatet for maksimal trykkdifferanse som gir en indikasjon på at vifteeffekten ville vært lavere for ringledning, dersom ikke hele byggets luftmengde ble tatt med.

På grunn av liten forskjell i resultatet mellom ringledning og tradisjonell, er det valgt å beholde de generelle retningslinjene for tradisjonelle ventilasjonsanlegg. Det er derfor laget veiledninger til bruk av programvarer for dimensjonering av ringledninger.

For å konkludere bidrar ringledningen på Gjennestad til å redusere trykk, lufthastighet og vifteeffekt iforhold til to-grenet tradisjonell utforming. Reduksjonen er liten og derfor beholdes dagens dimensjoneringskriterier for tradisjonelle ventilasjonsanlegg. For alle resultatene er det belastning 3 som utgjør størst forskjell. Et ubalansert belastningsscenario vil trolig gi mer besparelser. Det bør derfor undersøkes mer for ringledning i ventilasjon.

9 Videre arbeid

I denne oppgaven undersøkes kun én sammenkobling i ringledningen, men det hadde vært interessant å vite påvirkningen av flere sammenkoblinger i større ringledningssystemer. Ved flere koblinger vil luftmengden bevege seg med flere mulige veier. Dette kan føre til mulig høyere besparelse. Det har blitt simulert for trykkfall, men lydberegning er også viktig for kanaldimensjonering. Det bør finnes alternative måter for lydberegning eller muligheten for å verifisere at lydberegningen i MagiCAD for ringledning er akseptert. Ut fra oppgaven er det størst endringer ved belastning 3. Det er derfor interessant å undersøke flere ubalanserte belastninger, for eksempel 75/25. Tilslutt anbefales det å studere flere tradisjonelle systemer i forhold til ringledninger. Det finnes mange måter å designe et ventilasjonsanlegg. Ventilasjonsanlegg med grunnleggende tradisjonell utforming gir muligens større besparelser enn to-grenet iforhold til ringledning.

For oppsummering anbefales det å undersøke videre:

- Flere sammenkoblinger i ringledning
- Lydberegninger
- Flere belastningsscenarioer
- Sammenligne ringledning med andre tradisjonelle utforminger

Referanser

- [1] Hallströms. Spjäll his klass 1. Hentet fra: <https://hallstroms.se/shop/product/2868> Lastet ned: 11.03.2020.
- [2] G. J. Levermore. Duct Loop Systems - Savings and Performance. *ASHRAE Transactions*, 111(1):507–514, 2005.
- [3] John Clark. What Is A Loop Duct? *Engineered Systems*, 23(7):63, 2006.
- [4] Ole B. Stampe and Finn H. Ludvigsen. *Ventilation Ståbi*. Nyt Teknisk Forlag, 2015.
- [5] Seung-Chul Lee, Jae-Heon Lee, and Myung-Do Oh. Measurement and predictions for the flow distribution of a complex duct system with loop for energy saving. *International journal of energy research*, 25:263–273, 2001.
- [6] I. Khoo, G.J. Levermore, and K.M. Letherman. Duct loops and VAV modelling and Control. In *Proceedings of Clima2000 World Congress, Brussels, Belgium*, 1997.
- [7] Mads Mysen. Personlig kommunikasjon.
- [8] Ezio Todini. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2):115–122, 2000.
- [9] Dejan Brkić. An improvement of Hardy Cross method applied on looped spatial natural gas distribution networks. *Applied Energy*, 86(7):1290–1300, 2009.
- [10] Ken J. Butcher. CIBSE Guide K - Electricity in Buildings - 5.4.2.2 Ring Mains, 2004.
- [11] Gunnar G. Løvås. *Statistikk for universiteter og høyskoler*. Universitetsforlaget AS, 2018.
- [12] Per Johansson and Anders Svensson. *Metoder för mätning av luftflöden i ventilationsinstallationer*. Byggeforskningsrådet, 1999.
- [13] Peter Schild. Time-series-explorer. v200221. Hentet fra: <https://github.com/SchildCode/Time-Series-Explorer> Lastet ned: 22.02.2020.
- [14] Progman OY. *MagiCAD Ventilation Technical Specification*, 2002.
- [15] H. Ito and K. Imai. Energy losses at 908 pipe junctions. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, 1973.

-
- [16] Lars Jensen. *PFS++ reference manual - TVIT-15/7100*. Lunds Universitet, September 2015.
- [17] Sturla Ingebrigtsen. *Ventilasjonsteknikk Del II*. Oslo, Skarland Press AS, 2016.
- [18] Sintef Byggforsk. 421.503 *Luftmengder i ventilasjonsanlegg. Krav og anbefalinger*. Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/2753/luftmengder_i_ventilasjonsanlegg_krav_og_anbefalinger Lastet ned: 25.05.2020.

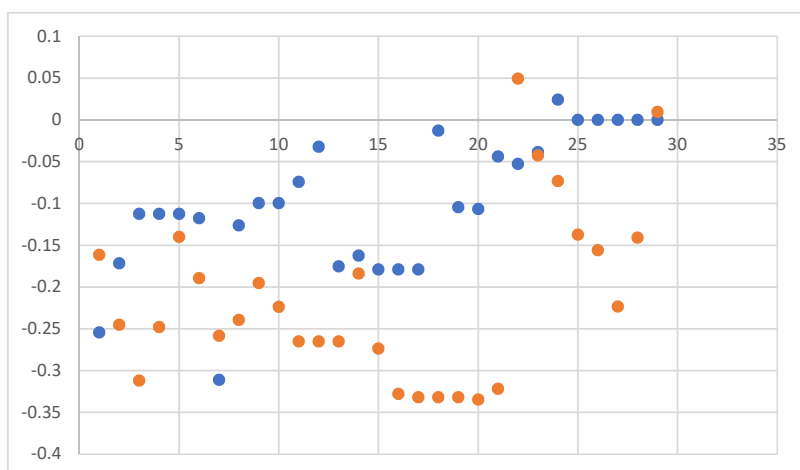
10 Vedlegg

- Vedlegg A - Paret T-Test av korttidsmålinger for vifteeffekt
- Vedlegg B - Paret T-Test av maksimal trykkdifferanse
- Vedlegg C - Resultat av PFS simulering for casebygg
- Vedlegg D - MagiCAD veiledning for ringledning i ventilasjon
- Vedlegg E - PFS veiledning for ringledning i ventilasjon

A Paret T-Test av korttidsmålinger for vifteeffekt

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

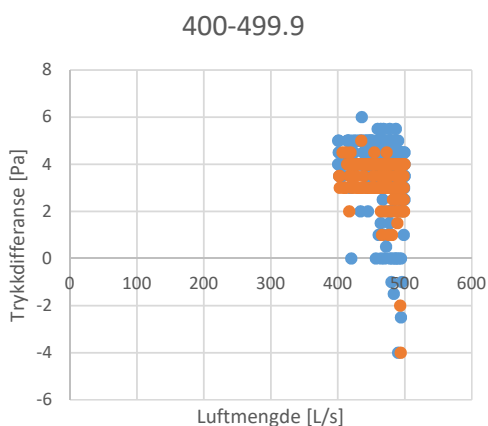
	Variable 1	Variable 2
Mean	-0.21237	-0.11809
Variance	0.010709	0.005781
Observations	29	24
Pooled Variance	0.008486	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	51	
t Stat	-3.70888	
P(T<=t) one-tail	0.000257	
t Critical one-tail	1.675285	
P(T<=t) two-tail	0.000515	
t Critical two-tail	2.007584	



B Paret T-Test av maksimal trykklifferanse

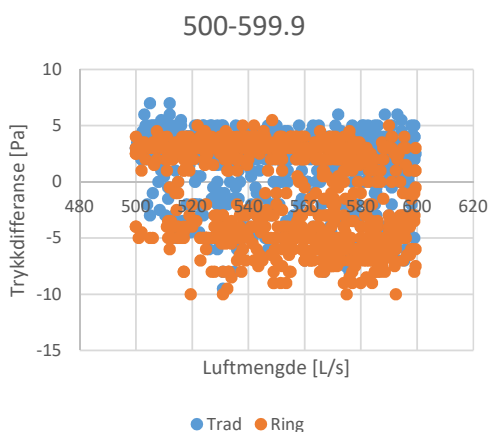
400-499.9

	Variable 1	Variable 2
Mean	3.606154	3.327586
Variance	1.688542	0.970102
Observations	325	174
Pooled Variance	1.438461	
Hypothesized Mean Diff.	0	
df	497	
t Stat	2.472564	
P(T<=t) one-tail	0.006874	
t Critical one-tail	1.647925	
P(T<=t) two-tail	0.013748	
t Critical two-tail	1.964749	



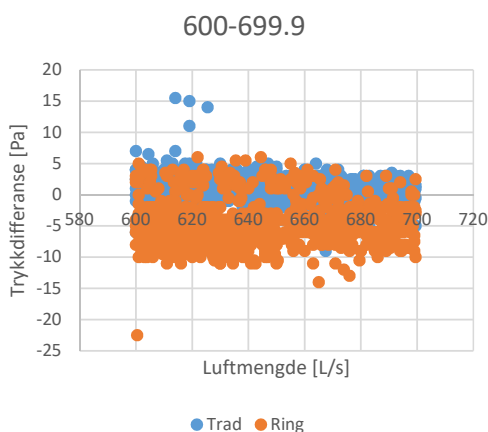
500-599.9

	Variable 1	Variable 2
Mean	1.799873	-1.28283
Variance	9.180954	17.53874
Observations	787	792
Pooled Variance	13.3731	
Hypothesized Mean Diff.	0	
df	1577	
t Stat	16.74844	
P(T<=t) one-tail	2.23E-58	
t Critical one-tail	1.64582	
P(T<=t) two-tail	4.47E-58	
t Critical two-tail	1.961469	



600-699.9

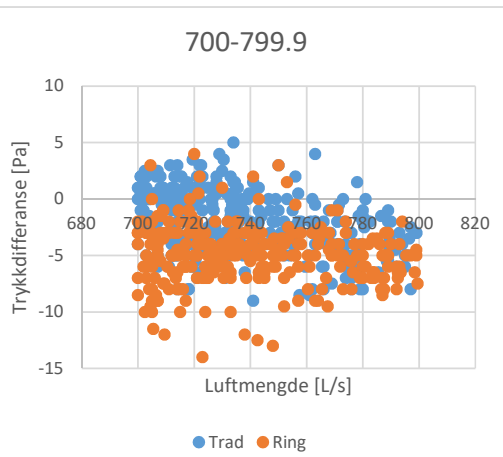
	Variable 1	Variable 2
Mean	0.651678	-4.48237
Variance	6.668495	14.192
Observations	745	794
Pooled Variance	10.55017	
Hypothesized Mean Diff.	0	
df	1537	
t Stat	30.98839	
P(T<=t) one-tail	1.7E-164	
t Critical one-tail	1.645846	
P(T<=t) two-tail	3.3E-164	
t Critical two-tail	1.961509	



B PARET T-TEST AV MAKSIMAL TRYKKDIFFERANSE

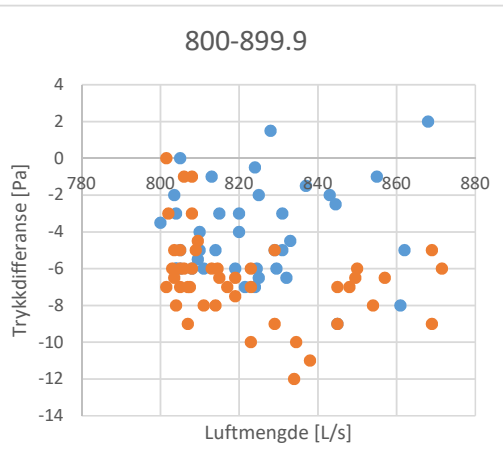
700-799.9

	Variable 1	Variable 2
Mean	-2.02969	-4.92188
Variance	7.636263	6.742133
Observations	320	288
Pooled Variance	7.212806	
Hypothesized Mean Diff.	0	
df	606	
t Stat	13.25848	
P(T<=t) one-tail	1.03E-35	
t Critical one-tail	1.647372	
P(T<=t) two-tail	2.07E-35	
t Critical two-tail	1.963886	



800-899.9

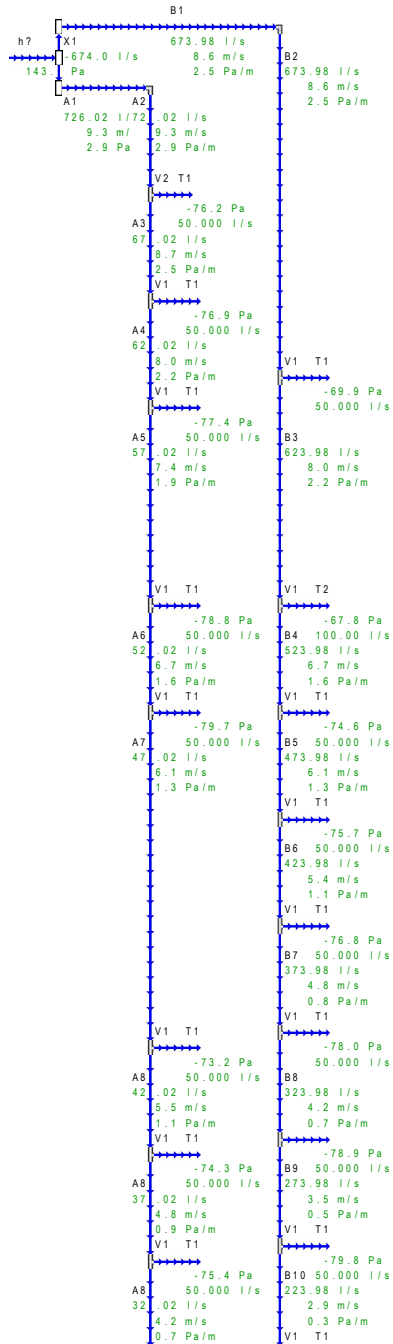
	Variable 1	Variable 2
Mean	-4.1125	-6.48913
Variance	6.378045	5.705435
Observations	40	46
Pooled Variance	6.017718	
Hypothesized Mean Diff.	0	
df	84	
t Stat	4.481314	
P(T<=t) one-tail	1.16E-05	
t Critical one-tail	1.663197	
P(T<=t) two-tail	2.33E-05	
t Critical two-tail	1.98861	



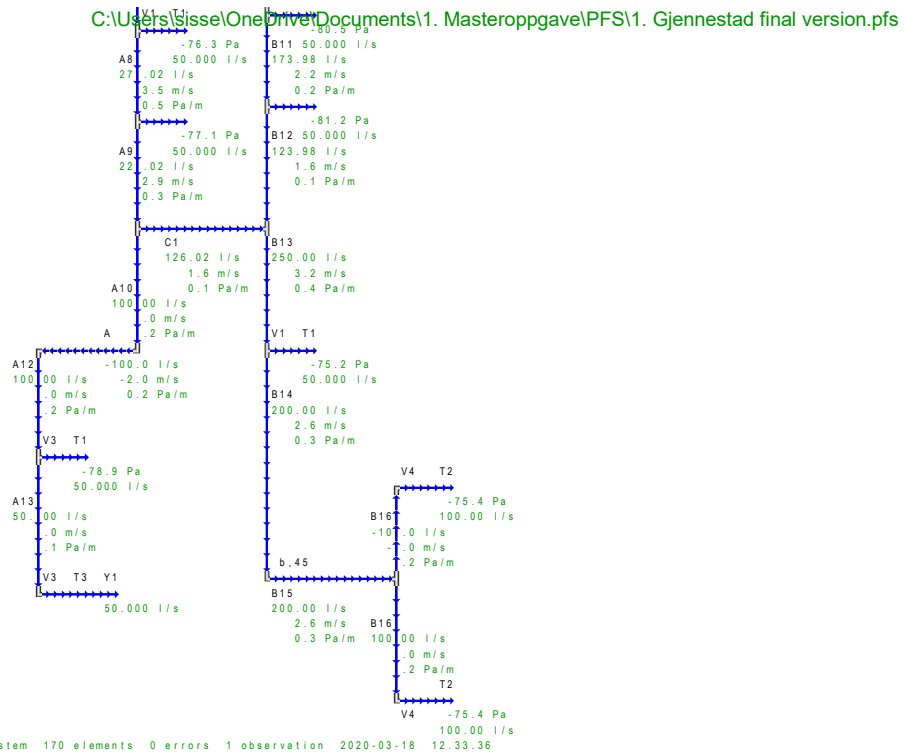
C Resultat av PFS simulering for casebygg

```

begin
flow l/s
control bend=1 con=1 duct=1 trix=1
set A1=d,315,0.725:qVR A2=d,315,2.002:qVR A3=d,315,2.066:qVR A4=d,315,2.354:qVR A5=d,315,1.977:qVR
set A6=d,315,2.350:qVR A7=d,315,8.050:qVR A8=d,315,2.330:qVR A9=d,315,0.60:qVR
set A10=d,250,0.548:qVR A11=d,250,1.325:qVR A12=d,250,0.211:qVR A13=d,250,2.24:qVR
set B1=d,315,2.175:qVR B2=d,315,6.689:qVR B3=d,315,3.016:qVR B4=d,315,2.384:qVR
set B5=d,315,2.240:qVR B6=d,315,2.370:qVR B7=d,315,2.270:qVR B8=d,315,2.290:qVR B9=d,315,2.265:qVR
set B10=d,315,2.375:qVR B11=d,315,2.210:qVR B12=d,315,1.507:qVR B13=d,315,0.43:qVR B14=d,315,2.308:qVR B15=d,315,1.303:qVR B16=d,250,1.306:qVR
set V1=d,160,2.222 V2=d,160,1.699 V3=d,160,0.430 V4=d,250,0
set C1=d,315,1.135:qVR
set T1=l750:q T2=l7100:q T3=t,80,50
set X1=d,1000,1:q
set Y1=q,50:q
    
```



C RESULTAT AV PFS SIMULERING FOR CASEBYGG

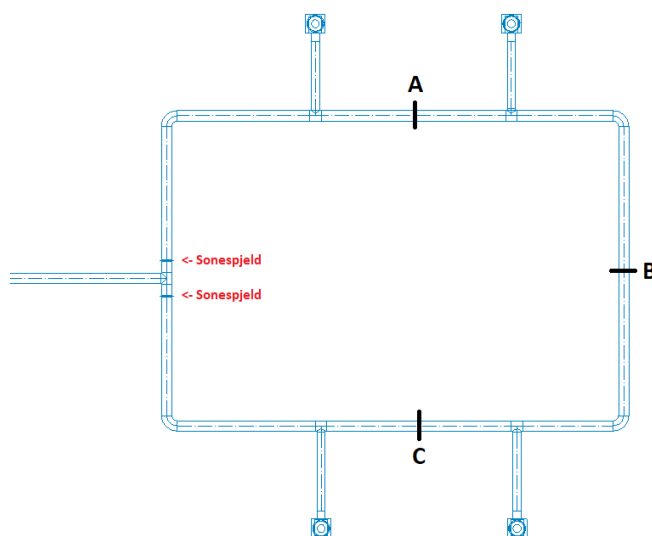


D MagiCAD veiledning for ringledning i ventilasjon

Trinnvis forklaring:

1. Åpne prosjektfilen i revit og last inn MagiCAD plug-in.
2. Dimensjoner ventilasjonsanlegget på tilsvarende måte som et tradisjonelt anlegg. Dimensjonen for hovedkanalen i ringledningen kan velges ut fra flere metoder:
 - Eksisterende anlegg → Tegn den faktiske dimensjonen
 - Nytt anlegg med behovsstyring:
 - Velg en konstant diameter for hele ringen ut fra halvparten av dimensjonerende luftmengde som ringledning skal tilføre luft til.
 - Estimer maksimal hastighet i kanalen for eksempel 5 m/s, forutsatt dimensjonering med hensyn til samtidighetsfaktor. Se kapittel 5 i byggforsk 421.503 for beregning av behovsstyrte luftmengder [18].
 - Automatisk dimensjonering i MagiCAD ved bruk av "MagiCAD Ventilation" → "Calculation" → "Sizing" med enten maksimum hastighets 3-8 m/s eller maksimum trykktapsgradient 1 Pa/m.
3. Del ringledningen hvor man tror er balansepunktet ved bruk av "split element".
4. Sett på endeløkk på hver side av delingen ved å trykke på de åpne endene → "Cap Open Ends".
5. Det finnes to måter å undersøke om plasseringen av delepunktet er riktig:
 - Trykket på hver ende av kanalene i ringledningen er tilnærmet like
 - Trykket etter sonespjeldene er tilnærmet like. Dersom man velger dette alternativet, legges det til to sonespjeld på hver side der luften kommer inn i ringledningen, se figur 32.
6. Beregn trykk ved bruk av "MagiCAD ventilation" → "Calculation" → "Balancing". Klikk hvor som helst på kanalen.
7. Resultatet åpnes automatisk i et eget vindu. For å hente resultatet for begge ender se figur 33 og for sonespjeldene se figur 34.
8. Dersom begge kanalendene eller sonespjeldene har tilnærmet lik total trykk (pt) → OK → steg 12.

9. Dersom det er stor forskjell på "pt" mellom endene eller mellom sonespjeldene → Følg steg 10.
10. Delingen av ringledningen flyttes i retning mot siden med lavest trykk. Eksempler på delepunkter vises i fig. 32. Beregn trykket igjen ved å følge steg 6. Dette gjøres helt til begge sider viser tilnærmet lik "pt" enten ved begge ender av kanalene eller ved sonespjeldene (tabell 11).
11. Det totale trykkfallet (pt) for hele ringledningen vil være øverst i resultatetvinduet. Det som er markert blått i figur 33 og 34.
12. Det kan nå utføres lydberegninger for det samme systemet ved bruk av "Calculation" → "Sound Calculation".

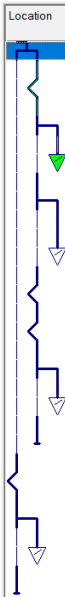


Figur 32: Eksempel på delepunkter for ringledning

Delingspunkt	Enden av kanalene		Delingspunkt	Sonespjeldene	
	Øvre pt [Pa]	Nedre pt [Pa]		Øvre pt [Pa]	Nedre pt [Pa]
A	25,2	16,5	A	26,5	25,3
B	15,5	15,6	B	18,9	18,9
C	16,4	25,3	C	25,4	26,5


Tabell 11: Resultat av trykkberegning mellom enden av kanalene og sonespjeldene

D MAGICAD VEILEDNING FOR RINGLEDNING I VENTILASJON



Location	Level	Node	Type	Series	Product	Size	L [m]	Insulation	qv set [m³/h]	qv [m³/h]	v [m/s]	dpt [Pa]	K factor	dp/L [Pa/m]	pt [Pa]	pst [Pa]	adj.	qv [%]	Warnings
Plan 2		1	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/315			1200	1200	4.3	13.1	1.196			38.1			
Plan 2			DUCT	KK002T		315	4.5		900	900	3.2	1.9		0.42	24.9	18.7			
Plan 2			BEND-90	KK002T	MAGIB-C4	315			900	900	3.2	1.7	0.272		23.0				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	4.1		900	900	3.2	1.7		0.42	21.4	15.2			
Plan 2		2	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/250			900	900	3.2	6.5	1.056		19.6				
Plan 2			DUCT	KK002T		250	2.1		300	300	1.7	0.4		0.18	13.1	11.4			
Plan 2		3	SUPPLY		LOV-R-250	250			300	300	1.7	12.8			12.8		100	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	5.7		600	600	2.1	1.1		0.20	19.2	16.4			
Plan 2		4	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/250			600	600	2.1	3.1	1.126		18.1				
Plan 2			REDUCER	KK002T	MAGIR-CC	250			300	300	1.7				15.0				
Plan 2			DUCT	KK002T		250	2.1		300	300	1.7	0.4		0.18	15.0	13.2			
Plan 2		5	SUPPLY		LOV-R-250	250			300	300	1.7	14.6			14.6		92	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	2.9		300	300	1.1	0.2		0.06	17.7	17.0			
Plan 2			BEND-90	KK002T	MAGIB-C4	315			300	300	1.1	0.2	0.338		17.5				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	8.9		300	300	1.1	0.5		0.06	17.3	16.6			
Plan 2			BEND-90	KK002T	MAGIB-C4	315			300	300	1.1	0.2	0.338		16.8				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	2.8		300	300	1.1	0.2		0.06	16.6	15.9			
Plan 2		6	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/250			300	300	1.1	1.0	1.504		16.4				
Plan 2			DUCT	KK002T		250	2.4		300	300	1.7	0.4		0.18	15.4	13.6			
Plan 2		7	SUPPLY		LOV-R-250	250			300	300	1.7	15.0			15.0		91	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	2.8								16.4	16.4			
Plan 2		8	PLUG	KK002T	ESU_SE*0	315									16.4				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	4.0		300	300	1.1	0.2		0.06	26.0	25.3			
Plan 2			BEND-90	KK002T	MAGIB-C4	315			300	300	1.1	0.2	0.338		25.8				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	4.2		300	300	1.1	0.2		0.06	25.6	24.9			
Plan 2		9	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/250			300	300	1.1	1.0	1.504		25.3				
Plan 2			DUCT	KK002T		250	2.4		300	300	1.7	0.4		0.18	24.3	22.6			
Plan 2		10	SUPPLY		LOV-R-250	250			300	300	1.7	23.9			23.9		63	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	2.8								25.3	25.3			
Plan 2		11	PLUG	KK002T	ESU_SE*0	315									25.3				

Figur 33: Eksempel på henting av resultat for enden av kanalen



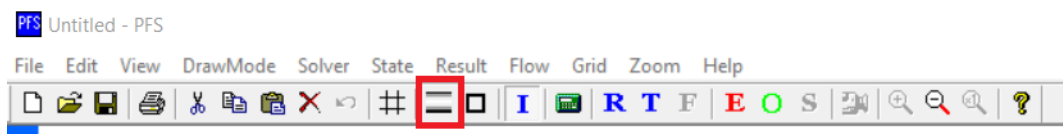
Location	Level	Node	Type	Series	Product	Size	L [m]	Insulation	qv set [m³/h]	qv [m³/h]	v [m/s]	dpt [Pa]	K factor	dp/L [Pa/m]	pt [Pa]	pst [Pa]	adj.	qv [%]	Warnings
Plan 2			DUCT	KK002T		315	5.8		1200	1200	4.3	4.2		0.72	42.7	31.8			
Plan 2		1	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/315			1200	1200	4.3	13.1	1.196		38.6				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	0.2		900	900	3.2	0.1		0.42	25.4	19.3			
Plan 2		2	FLOWDAM		IRIS-315	315			900	900	3.2	0.5			25.4		1.0	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	4.3		900	900	3.2	1.8		0.42	24.8	18.7			
Plan 2			BEND-90	KK002T	MAGIB-C4	315			900	900	3.2	1.7	0.272		23.0				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	4.1		900	900	3.2	1.7		0.42	21.4	15.2			
Plan 2		3	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/250			900	900	3.2	6.5	1.056		19.6				
Plan 2			DUCT	KK002T		250	2.1		300	300	1.7	0.4		0.18	13.1	11.4			
Plan 2		4	SUPPLY		LOV-R-250	250			300	300	1.7	12.8			12.8		100	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	5.7		600	600	2.1	1.1		0.20	19.2	16.4			
Plan 2		5	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/250			600	600	2.1	3.1	1.126		18.1				
Plan 2			REDUCER	KK002T	MAGIR-CC	250			300	300	1.7				15.0				
Plan 2			DUCT	KK002T		250	2.1		300	300	1.7	0.4		0.18	15.0	13.2			
Plan 2		6	SUPPLY		LOV-R-250	250			300	300	1.7	14.6			14.6		92	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	2.9		300	300	1.1	0.2		0.06	17.7	17.0			
Plan 2			BEND-90	KK002T	MAGIB-C4	315			300	300	1.1	0.2	0.338		17.5				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	8.9		300	300	1.1	0.5		0.06	17.3	16.6			
Plan 2			BEND-90	KK002T	MAGIB-C4	315			300	300	1.1	0.2	0.338		16.8				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	2.8		300	300	1.1	0.2		0.06	16.6	15.9			
Plan 2		7	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/250			300	300	1.1	1.0	1.504		16.4				
Plan 2			DUCT	KK002T		250	2.4		300	300	1.7	0.4		0.18	15.4	13.6			
Plan 2		8	SUPPLY		LOV-R-250	250			300	300	1.7	15.0			15.0		91	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	2.8								16.4	16.4			
Plan 2		9	PLUG	KK002T	ESU_SE*0	315									16.4				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	0.2		300	300	1.1	0.0		0.06	26.5	25.9			
Plan 2		10	FLOWDAM		IRIS-315	315			300	300	1.1	11.6			26.5		7.3	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	3.8		300	300	1.1	0.2		0.06	14.9	14.2			
Plan 2			BEND-90	KK002T	MAGIB-C4	315			300	300	1.1	0.2	0.338		14.7				
Plan 2			DUCT	KK002T		315	4.2		300	300	1.1	0.2		0.06	14.5	13.8			
Plan 2		11	T-BRANCH	KK002T	TCPU_DK	315/250			300	300	1.1	1.0	1.504		14.2				
Plan 2			DUCT	KK002T		250	2.4		300	300	1.7	0.4		0.18	13.2	11.4			
Plan 2		12	SUPPLY		LOV-R-250	250			300	300	1.7	12.8			12.8		100	100	
Plan 2			DUCT	KK002T		315	2.8								14.2	14.2			
Plan 2		13	PLUG	KK002T	ESU_SF*0	315									14.2				

Figur 34: Eksempel på henting av resultat for sonespjeldene

E PFS veiledning for ringledning i ventilasjon

Trinnvis forklaring:

1. Åpne en ny fil på PFS og lagre den med nytt navn.
2. Skriv inn "begin" for å starte koden.
3. Deretter definerer man enhetene om man ikke ønsker SI-enheter, for eksempel for luftmengde eller trykk.
4. Skriv inn "control" for å angi kontrollvariabler av designet som skal simuleres.
5. Angi kontrollvariablene med type bend, krysninger, kanaltype og justeringer. Verdien man setter for "bend", "con", "duct" og "trix" står beskrevet på s.94 i referanse manualen TVIT-15/7100 [16].
6. Legg av noen tomme linjer til senere for den resterende tekstkoden.
7. Tegn den grafiske koden med piltaster ved å bruke funksjonen markert med rød boks:



Figur 35: Eksempelkode

8. Navngi alle kanalstrekningen, ventilene, bendvinkel ($\neq 90^\circ$) og beregnings-elementene direkte i den grafiske koden.
9. Definer kanalstrekningens diameter, lengde, luftmengde, trykk for den styrende ventilen og ønsket printing i tekstkoden der det ble lagt av plass i steg 6.
10. Tilslutt skrives "end" under den grafiske koden.
11. For å beregne klikker man på "Solver" → "Calculate". Man får da opp resultatet direkte i samme vindu.
12. Får man "Error" kan man se nærmere forklaring ved å trykke på den røde knappen "E".

Nyttige elementer for bruk i PFS:

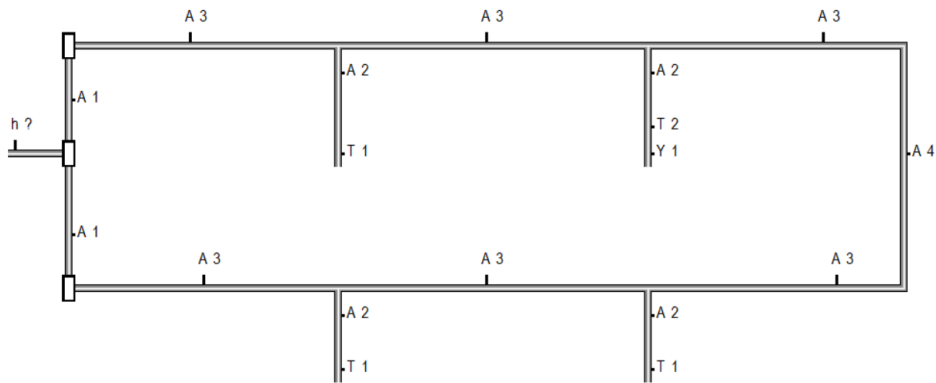
Elementer	Forklaring
Begin	Starter koden
Flow	Angir enheten på strømmingen
Control	Tildeling av kontroll variabler
Bend=1	Type bend = luftkanal
Con=1	Kryssninger (T-bend) = luftkanal
Duct=1	Type kanal = luftkanal
Trix=1	design/justering og resultat printing
Set	Setter verdier
d,verdi	kanaldiameter
:qvR	Printer ut luftmengde, hastighet, trykktapsgradient
t?verdi	Innjustering til luftmengden med angitt verdi for steg 1 og omregnet til kvadratisk struping for steg 2
b,45	45°bend
h?	Total trykk på beregningselementet
End	Avslutter koden
Ctrl + F	Trykkfri elementkobling
Enter	Trykkes før man navnsetter koblinger for å skifte tekstsider

PFS Syntaks [16]:

1. decgram, geogram, lingram, loggram, norgram, program, pergram, rank, result, status, table, export, import
2. begin
3. flow, pressure, effect, print, state, version, property
4. control
5. parameter, calculate, compute, define, iterate
6. fan, pump, supply, valve, diagram, function, segment, asymetric cooler, heater, heatgain, heatloss
7. design, diameter, lossfactor, losskvalue, lossFvalue, losslength, lossnp(q), connection, set
8. graphical code
9. end

Eksempelkode:

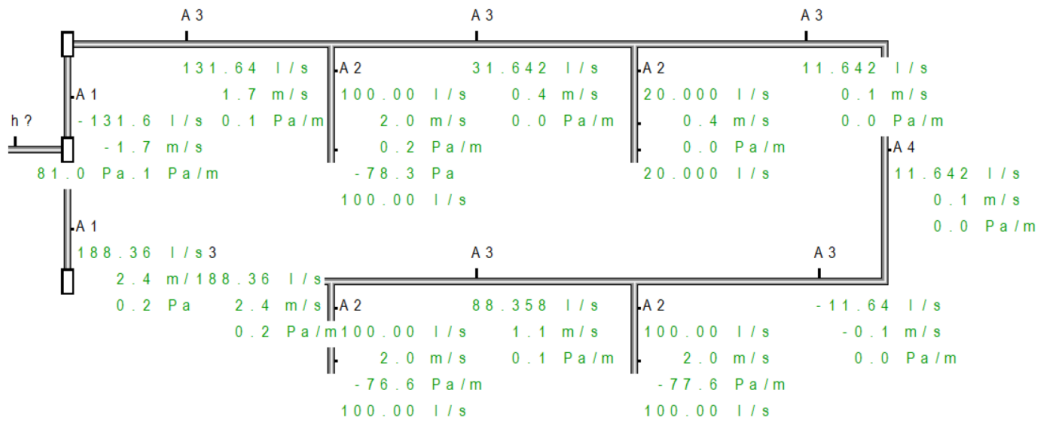
```
begin
flow l/s
control bend=1 con=1 duct=1 trix=1
set A1=d,315,1:qvR A2=d,250,2:qvR A3=d,315,3:qvR A4=d,315,1:qvR
set T1=t?100:q T2=t,80,20
set Y1=q,20:q
```



end

Figur 36: Eksempelkode

```
begin
flow l/s
control bend=1 con=1 duct=1 trix=1
set A1=d,315,1:qvR A2=d,250,2:qvR A3=d,315,3:qvR A4=d,315,1:qvR
set T1=t?100:q T2=t,80,20
set Y1=q,20:q
```



```
end 1 block 1 system 33 elements 0 errors 0 observations 2020-05-08 15.06.36
```

Figur 37: Resultat av eksempelkode