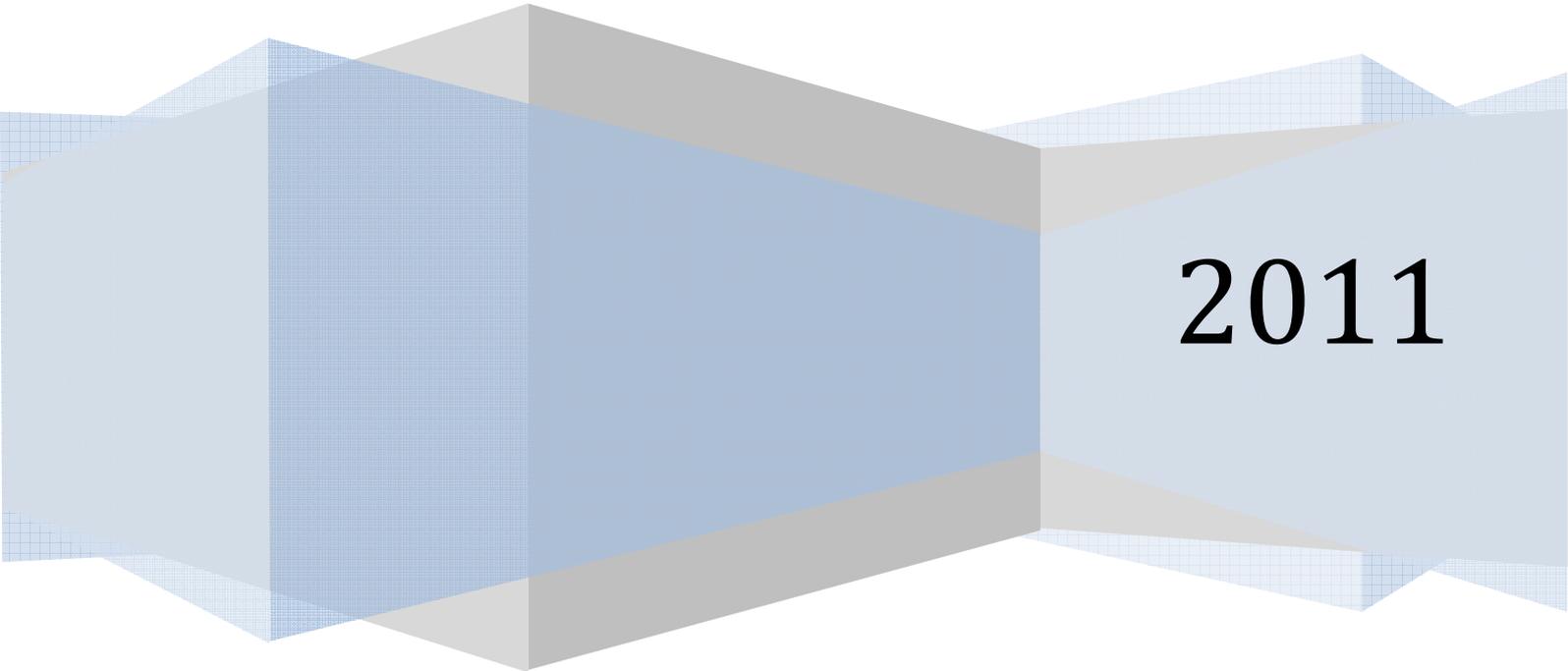


Aalborg Universitet
Byggeri og Anlæg
Speciale

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Magnus Wien Klæboe & Tore Wilhelmsen Herrmann
Juni 2011



2011

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Tittel:

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp.

Prosjektperiode:

Indeklima og energi, avgangsprosjekt
01.02.2011 – 16.06.2011

Prosjektgruppe:

Tore Wilhelmsen Herrmann
Magnus Wien Klæboe

Prosjektveileder:

Rasmus Lund Jensen

Rapport sideantall: 157

Antall vedlegg: 23

0 Forord

Denne rapporten er utarbeidet av to mastergradsstudenter som våren 2011 har studert "Indeklima og energi" under avdelingen Byggeri og Anlæg. Studiet har vært et samarbeid mellom Aalborg Universitet og Høgskolen i Oslo.

Rapporten har blitt utarbeidet gjennom siste semester i studiet. Målet med oppgaven er å bidra til forståelse for og kunnskap om behovstilpassede ventilasjonsanlegg generelt, med fokus på optimalisering av trykkstyrte anlegg spesielt.

Arbeidet med oppgaven har vært lærerikt. Foruten å takke hverandre for samarbeidet, vil vi også fremheve andre som har vært til stor hjelp i denne prosessen.

En stor takk rettes til vår hovedveileder lektor Rasmus Lund Jensen ved Aalborg Universitet. Han har hjulpet til med veiledning generelt og i forbindelse med målinger og kalibrering under logging spesielt. Gruppen ønsker også å takke professor Mads Mysen og professor Finn Drangsholt ved Høgskolen i Oslo, som har vært bi-veiledere og bidratt til idéer og konstruktive innspill til oppgavens innhold og metodebruk. En særskilt takk går også til førsteamanuensis Marius Lysebo ved Høgskolen i Oslo som har vært til stor hjelp under oppbyggingen av regnearket i matematikkverktøyet Matlab. En oppmerksomhet rettes også til masterstudentene Ole Daniels og Jesper Nørgaard, ved Aalborg Universitet, som bidro med oppsettet av software som ble benyttet til datalogging, samt generell hjelp til målemetoder. Til slutt vil gruppen takke alle de involverte i arbeidsmøtene som ble gjennomført i forbindelse med fokusering på behovstilpassede ventilasjonsanlegg i praksis, og hvilke momenter som må inngå i den videre prosessen med å få slike anlegg til å fungere optimalt (se utfyllende liste i kapittel 7.4).


Magnus Wien Klæboe


Tore Wilhelmsen Herrmann

1 Innholdsfortegnelse

2	Summary	6
3	Sammendrag	7
4	Innledning	8
5	Bakgrunn	10
5.1	Klima og energibruk – ventilasjonens betydning	10
5.2	Hvorfor ventilere bygg?	15
5.2.1	Ventilasjon, helse og produktivitet.....	17
5.2.2	lover og forskrifter.....	22
6	Hvordan ventilere bygg på en energieffektiv måte?	23
6.1	Spesifikk vifteeffekt - SFP	23
6.2	Behovstilpasset ventilasjon	25
6.3	Ulike typer reguleringsprinsipper for behovstilpasset ventilasjon	28
6.3.1	Trykkstyring.....	28
6.3.2	Trykkstyring med optimizer (Static Pressure Reset, SPR).....	30
6.3.3	Mengderegulering (Digital Controlled Ventilation, DCV)	32
6.3.4	Luftmengderegulering med variable tilluftsventiler (VAV diffusor)	33
6.3.5	Sammenligning av de ulike reguleringsprinsippene	35
6.3.6	Ulike reguleringsparametre	36
7	Metoder	41
7.1	Litteraturstudier	41
7.2	Beregningsverktøy	41
7.2.1	Oppbygging av regneverktøyet.....	42
7.2.2	Beregninger av luftmengder – innregulering	43
7.2.3	Beregninger av statisk trykk og plassering av trykksensor	50
7.3	Målinger	54
7.3.1	Oppbygging av kanalnettet.....	54
7.3.2	Innregulering av anlegget	56
7.3.3	Målinger.....	57
7.4	Intervjusamtaler av fokusgrupper	64
8	Resultater	65
8.1	Optimalisering gjennom bruk av matematiske beregningsverktøy	65
8.2	Validering luftmengdefordeling	65
8.3	Beregninger av luftmengdefordeling med konstant statisk trykk	69
8.3.1	Resultater og diskusjon.....	70
8.4	Beregning av luftmengdefordeling og nødvendig trykkfall over VAV-spjeld - Spjeldautoritet	90
8.4.1	Resultater og diskusjon.....	90
8.5	Beregninger for variabelt statisk trykk	97
8.6	Validering av beregningsresultater	97
8.7	Laboratoriemålinger av fysisk kanalnett	98
8.7.1	Ulike scenarioer.....	98
8.7.2	Logging av statisk trykk.....	100
8.7.3	Resultater og diskusjon.....	100
8.7.4	Luftmengdefordeling – resultat og diskusjon	113
8.7.5	SFP og energibruk	121

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

8.8	Bedre behovsstyring med bedre beskrivelse og krav	127
8.8.1	Kravspesifikasjon og beskrivelse – resultater og diskusjon	127
8.8.2	Overlevering - Kontroll- og driftsrutiner	136
8.9	Måleusikkerhet.....	138
8.9.1	Logging av statisk trykk.....	139
8.9.2	Manuell måling av statisk trykk.....	140
8.9.3	Luftmengdemåling i uttak.....	140
8.9.4	Luftmengdemåling for hovedluftmengde.....	140
8.9.5	Effektmåling.....	141
8.9.6	Barometertrykk.....	141
8.9.7	Måleusikkerhet i resultatene	141
9	Diskusjon	142
9.1	Litteraturstudie	142
9.2	Målinger av luftmengdefordeling	142
9.3	Logging av statisk trykk.....	143
9.4	Beregninger av luftmengdefordeling med konstant statisk trykk	144
9.5	Beregninger av luftmengdefordeling og nødvendig trykkfall over VAV-spjeld - Spjeldautoritet	145
9.5.1	Utfordringer i beregningsverktøyet.....	146
9.6	Kravspesifikasjon og beskrivelse	147
10	Konklusjon	148
10.1	Plassering av trykksensor og kanaldesign	148
10.2	Kravspesifikasjon og beskrivelser	149
10.3	Anbefalinger for videre arbeid	150
10.3.1	Videreutvikling av beregningsverktøy	150
10.3.2	Kravspesifikasjoner i praksis	151
11	Bibliografi.....	152
12	Vedleggsoversikt.....	157

2 Summary

Demand Controlled Ventilation will become necessary in order to meet the stated requirements for energy conservation in future building regulations. Although there are good examples of well functioning ventilation systems and substantial knowledge within this field, there is also evidence indicating that such systems lack optimal functioning and thereby fail to achieve the saving potential which is postulated (Grini, 2010).

The purpose with this report is to contribute with understanding and knowledge of Demand Controlled Ventilation in general, focussing on the optimization and development of pressure controlled systems in particular.

Regulating the main air supply by means of static pressure control is a well established principle in Demand Controlled Ventilation. Such systems are today widely used, nevertheless the system is not well functioning. Inadequate positioning of pressure sensors, skewed air distribution between duct outlets, unnecessary damper pressure drops and thereby reduced energy efficiency related to fan power, are typical problems for these systems. These are issues which this report sets out to highlight and preferably find solutions to and thereby improve this type of regulatory principle.

The investigations conducted in this report are substantial. They include literary studies, laboratory measurements of a ventilation system, calculation of pressure conditions and air volume using a purpose designed mathematical tool and interviews with ventilation professionals. The methods are extensively documented so as to make the process explicit. There has been an emphasis on producing a transparent report, so that the readers can control what has been done and critically assess the results.

Through measurements, literature studies and calculations, this report documents that in most cases it will be reasonable to place the static pressure sensor towards the end of the main duct. In most cases this will provide the best distribution of air. Results from measurements of variations in pressure from different sensor positions also confirm that a positioning late in the duct system will give the most stable static pressure measurements.

Calculations also show that duct network with equal dimension throughout the whole main duct have the most stable pressure changes, which increases the stability and robustness of the ventilation system. Combined with lower pressure drop in the main duct, this gives a higher authority over the variable airflow dampers and improves the SFP-factor.

With the help of ventilation experts and workshops, it was also established a number of demands that the group think will contribute to more energy efficient, functional and robust ventilation systems in practice.

3 Sammendrag

Behovstilpassede ventilasjonsanlegg blir en forutsetning for å tilfredsstille energikrav i fremtidige byggeforskrifter. Selv om det finnes gode eksempler på velfungerende behovstilpassede ventilasjonsanlegg og omfattende kompetanse innen området, er erfaringen hos mange i bransjen at slike anlegg ikke fungerer som de skal, og at de ikke klarer å utnytte det fulle sparepotensialet som teorien tilsier (Grini, 2010).

Målet med denne oppgaven er å bidra til forståelse og kunnskap om behovstilpassede ventilasjonsanlegg generelt, med fokus på å optimalisere og videreutvikle trykkstyrte anlegg spesielt.

Regulering av hovedluftmengder ved hjelp av statisk trykkregulering er et anerkjent prinsipp for behovstilpassede ventilasjonsanlegg. Slike anlegg er per dags dato de som blir mest brukt, likevel er dette systemet ikke velfungerende. U hensiktsmessig plassering av trykksensor, skjev luftmengdefordeling mellom kanaluttak, unødvendig struping over spjeld og dermed lite energieffektiv viftedrift, er typiske problemer for slike systemer. Dette er problemstillinger denne oppgaven ønsket å belyse ytterligere og i bestefall finne løsninger på og dermed forbedre denne type reguleringsprinsipp.

Undersøkelsene som har blitt gjennomført i denne oppgaven har vært omfattende. Disse innebærer litteraturstudier, laboratoriemålinger på et ventilasjonsanlegg, beregninger av trykkforhold og luftmengder i et egenprodusert regneverktøy, og arbeidsmøter med faggrupper i ventilasjonsbransjen. Metodene er utførlig dokumentert for å tydeliggjøre prosessen. Det er lagt vekt på å produsere en transparent oppgave, slik at andre kan kontrollere hva som er gjort og kritisk vurdere resultatene.

Det dokumenteres i denne rapporten både gjennom målinger, litteraturstudie og beregninger, at det i de fleste tilfeller vil være mest fornuftig å plassere den statiske trykksensoren mot slutten av kanalnettet. Dette fører i de fleste tilfeller til den gunstigste luftmengdefordelingen. Resultater fra målinger av trykksvingninger for ulike sensorplasseringer bekrefter også at en plassering sent i kanalnettet vil gi de mest stabile statiske trykkmålingene.

Beregninger viser også at kanalnett med lik dimensjon har de mest stabile trykkendringene VAV-spjeldene seg i mellom, noe som øker stabiliteten og robustheten i anlegget. Kombinert med lavere trykkfall i hovedkanalen, gir dette en høyere autoritet over VAV-spjeldene, samtidig som SFP-faktoren blir bedre.

Ved hjelp av arbeidsmøtene ble det også konkludert med en rekke momenter som vil bidra til mer energieffektive og robuste ventilasjonsanlegg i praksis.

4 Innledning

Utviklingen av behovstilpassede ventilasjonsanlegg går raskt. Slike anlegg blir en forutsetning for å tilfredsstille energikrav i fremtidige byggeforskrifter. Selv om det finnes gode eksempler på velfungerende behovstilpassede ventilasjonsanlegg og omfattende kompetanse innen området, er erfaringen hos mange i bransjen at slike anlegg ikke fungerer som de skal, og at de ikke klarer å utnytte det fulle sparepotensialet som teorien tilsier (Grini, 2010).

Målet med denne oppgaven er å bidra til forståelse og kunnskap om behovstilpassede ventilasjonsanlegg generelt, med fokus på å optimalisere og videreutvikle trykkstyrte anlegg spesielt.

Regulering av hovedluftmengder ved hjelp av statisk trykkregulering er et anerkjent prinsipp for behovstilpassede ventilasjonsanlegg. Slike anlegg er per dags dato de som blir mest brukt, likevel er dette systemet ikke velfungerende. Uhensiktsmessig plassering av trykksensor, skjev luftmengdefordeling mellom kanaluttak, unødvendig struping over spjeld og dermed lite energieffektiv viftedrift, er typiske problemer for slike systemer. Dette er problemstillinger denne oppgaven ønsker å belyse ytterligere og i bestefall finne løsninger på og dermed forbedre denne type reguleringsprinsipp.

For å belyse oppgavens tema og problemstillinger er det valgt følgende strategi:

- En beskrivende vurdering av ulike typer reguleringsprinsipper innen behovstilpasset ventilasjon, med fokus på funksjon, robusthet, energibruk og pålitelighet.
- Ved hjelp av laboratoriemålinger og beregninger skal sammenhengen mellom plassering av trykksensor, spjeldautoritet, luftmengder i forhold til avvik og nøyaktighet, samt energibruk kartlegges for behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring.
- Et samarbeid i en arbeidsgruppe med forskjellige faggrupper fra ventilasjonsbransjen for å drøfte forslag til hvilke momenter og krav som bør stilles for å sikre velfungerende behovstilpassede ventilasjonsanlegg i praksis.

Rapporten er delt inn i fem deler.

Som bakgrunn blir det først redegjort for hva som begrunner energieffektivisering som tiltak for å redusere energibruk. Videre beskrives betydningen av god ventilasjon med særlig vekt på inn klima, helsevariabler og brukeres produktivitet. Dette knyttes også til dagens bygningsstruktur og lover og forskrifter for frisklufttilførsel.

Dernest beskrives ventilasjonen i bygg og hvordan denne energiposten kan effektiviseres og optimaliseres ved behovstilpassing av luftmengder. Det blir redegjort

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

for hvilke typer systemer som blir mest brukt i Norge, med styrker og svakheter til de forskjellige prinsippene. Videre gis en kort innføring i de reguleringsparametere som brukes i dag, i tillegg til et innblikk i hva vi kan vente oss i fremtiden.

I metodekapittelet blir det kort redegjort for hvordan litteraturstudiet har foregått. Her redegjøres også for laboratorieundersøkelsene og hvordan disse er utført, samt oppbygging og bruk av beregningsverktøy. Metodene er utførlig dokumentert for å tydeliggjøre prosessen. Det er lagt vekt på å produsere en transparent oppgave, slik at andre kan kontrollere hva som er gjort og kritisk vurdere resultatene. Målingene av trykkvariasjon og luftmengdefordeling ble utført i et formålskonstruert kanalnett i klimalaboratoriet på Aalborg Universitet. Både oppbyggingen av kanalnettet, innregulering av anlegget og de konkrete målinger relatert til ulike scenarioer, er grundig dokumentert slik at undersøkelsen er reproducerbar. Dette gjelder også oppbyggingen av beregningsverktøyet.

I resultatdelen presenteres også noe diskusjon av funnene. Dette er for å gjøre den direkte presentasjon av resultatene mer meningsbærende. Som et eget punkt, presenteres informasjon fra intervju samtaler med bransjen. Her vises det også til andre kilder som dokumenterer dette samarbeidet.

Rapporten avsluttes med en generell diskusjons- og konklusjonsdel hvor det trekkes slutninger og sammenhenger om de nevnte tema.

Oppgaven er begrenset til kun å se på forholdene i kanalnettet på tilluftssiden.

5 Bakgrunn

5.1 Klima og energibruk – ventilasjonens betydning

Økt kunnskap og bevis på blant annet klimaendringer og konsekvensene av dette, har ført til økt fokus på hvordan økningen i energibruken og de tilhørende klimautslippene kan bremses, og i beste fall reduseres. Dette har sammenheng med klimautslipp og klimaendringer, de økonomiske og menneskelige kostnadene ved dette og med begrensinger i energiressurser, samt forsyningssikkerhet.

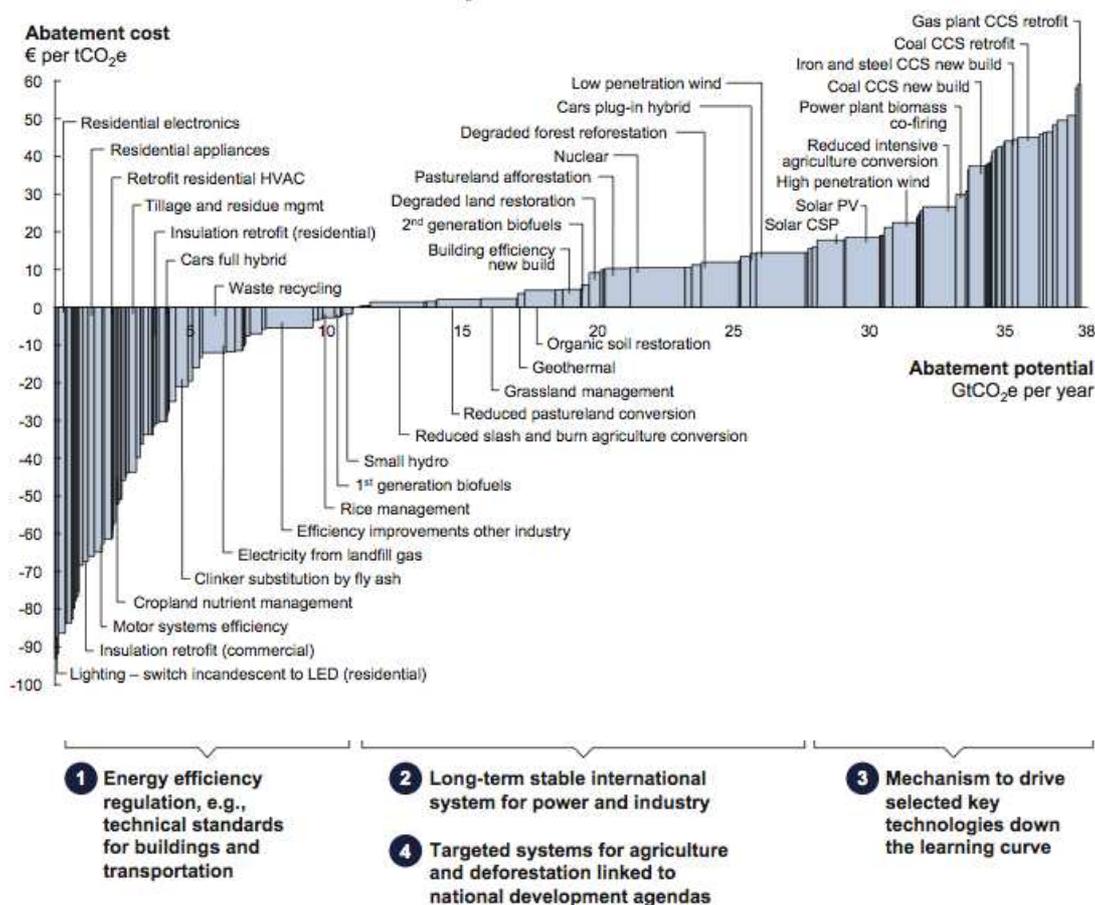
Det er i dag bred enighet blant forskere verden over om realiteten og konsekvensene av klimaendringene som har blitt registrert over tid og frem til i dag. Observasjoner og registrering av økt global gjennomsnittlig luft- og havtemperatur, påfølgende smelting av isbelagte områder og stigning i det globale havnivået, underbygger påstandene om klimaendringer på globalt plan. Det har i lengre tid vært usikkerhet i om disse endringene skyldes naturlige svingninger eller menneskelig aktivitet. Det tungtveiende klimapanelet i FN (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change) konkluderte i sin fjerde vurderingsrapport fra 2007 (IPCC, 2007) at det er mer enn 90 prosent sannsynlighet for at det meste av endringene skyldes økte konsentrasjoner av drivhusgasser i atmosfæren. Blant disse er CO₂-gass gjenstand for særskilt oppmerksomhet, da denne igjen er en konsekvens av menneskelig aktivitet gjennom bruk av fossile brensler og ved industriell avskogning.

Uten å gå dypere inn på konsekvensene av den såkalte globale oppvarmingen og det omdiskuterte, kritiske togradersmålet (IPCC, 2007), er det essensielt at utviklingen styres i riktig retning. Det er de siste årene utført flere internasjonale studier om hvordan man mest effektivt kan bremse eller redusere denne økningen i klimagasser. McKinsley & Company leverte i 2007 en rapport i samarbeid med det svenske kraftselskapet Vattenfall (McKinsey & Company, 2007) som konkluderte med at energieffektivisering¹ vil være det mest økonomiske (både privat- og samfunnsøkonomisk) og effektive tiltaket. Dette illustreres i Figur 5-1.

¹ Med energieffektivitet menes hvor mye ytelse i form av produksjon man får av den energien som brukes.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Global GHG abatement cost curve beyond business-as-usual – 2030

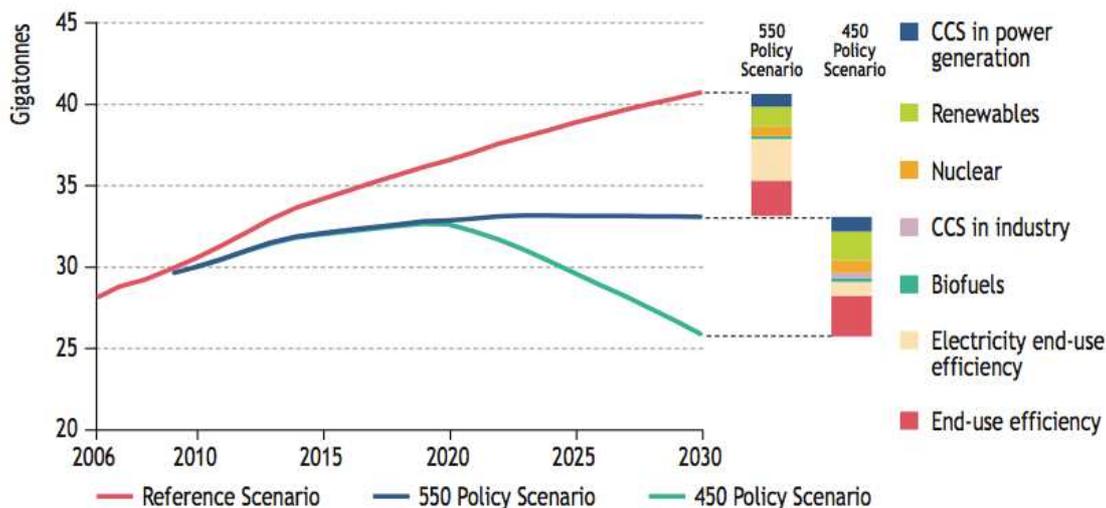


Figur 5-1. Kurven viser en oversikt over kostnad og potensial for klimagassutslipp ved ulike tiltak. (McKinsey & Company, 2007)

Søylene til venstre i Figur 5-1 representerer henholdsvis de mest lønnsomme og billigste tiltakene, og de til høyre de minst lønnsomme og dyreste. Som klammetegnet i figuren over viser, havner mange av søylene til venstre under kategorien energieffektivisering i bygninger, både i privat- og yrkessektor. Tiltakene er basert på teknologi og løsninger som finnes på markedet i dag.

Det internasjonale energibyrået (IEA - International Energy Agency) konkluderer også med at energieffektivisering vil være den viktigste løsningen for å bremse den globale oppvarmingen. Slike tiltak gir de største og raskeste klimagassreduksjonene. De anslår at 54 prosent av de nødvendige kuttene av klimagassutslipp frem mot 2030 må gjøres gjennom energieffektivisering (IEA, 2008), for å overholde det kritiske togradersmålet (IPCC, 2007), se Figur 5-2.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 5-2. Kurvene representerer ulike scenarier for klimagassutslipp frem mot 2030. (IEA, 2008)

Avhengig av hvilke energiformer som blir brukt i fremtiden, vil det være ulike scenarier i forhold klimagassutslipp fram mot 2030, Figur 5-2 viser noen slike scenarier. "450 Policy Scenario" er kurven som må følges for å holde CO₂-konsentrasjon i atmosfæren på 450 parts per million (forkortet ppm), en konsentrasjon som representerer maksimal temperaturøkning på 2 °C. "Electricity end-use efficiency" og "End-use efficiency" vil i så fall måtte stå for 54 prosent av klimagassreduksjonen. Undersøkelser fra EU/Enerdata viser også at energieffektivisering har vært den viktigste bidragsyteren til Europeisk energiforsyning de siste 35 år (EU/Enerdata, 2006).

Det skal også nevnes at det økende energibehovet de siste ti årene ble brutt i 2009. I 2010 presenterte Enerdata sin årlige statistikk på verdens totale energibruk, som viste at det i 2009 for første gang på 30 år var en reduksjon i energibruken (- 1,1 %) når man ser på hele verden samlet (Enerdata, 2010). Reduksjonen forklares med den store finanskrisen som inntraff over hele verden i 2009. Ser man nærmere på tallene var det OECD-landene² som sto for reduksjonen (- 4,7 prosent), mens utviklingsland, spesielt i Asia, hadde en økning på fire prosent.

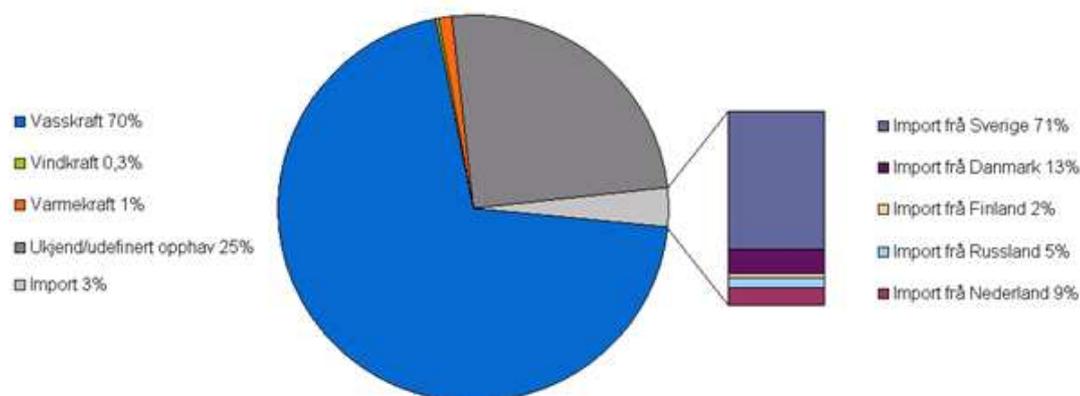
Energieffektivisering i bygg bidrar til å erstatte forurensende energikilder i andre sektorer og reduserer behovet for ny kraftproduksjon. Et populært uttrykk som går igjen i flere instanser er at den mest miljøvennlige energien er den man slipper å produsere. Med dette menes det at det er bedre og billigere å bli kvitt forbruket av en kWh enn det er å produsere og distribuere en kWh. I Norge står fornybare energikilder, herunder vannkraft, for 99 prosent av landets totale kraftproduksjon (Statkraft), og det kan da diskuteres om en reduksjon i miljøvennlig kraftproduksjon er et holdbart standpunkt.

Flere rapporter viser at Norge importerer mer kraft enn noensinne. Store deler av vårt strømforbruk blir dekket av ikke-fornybare energikilder som kull- og atomkraft. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) presenterer årlig en varedeklarasjon for

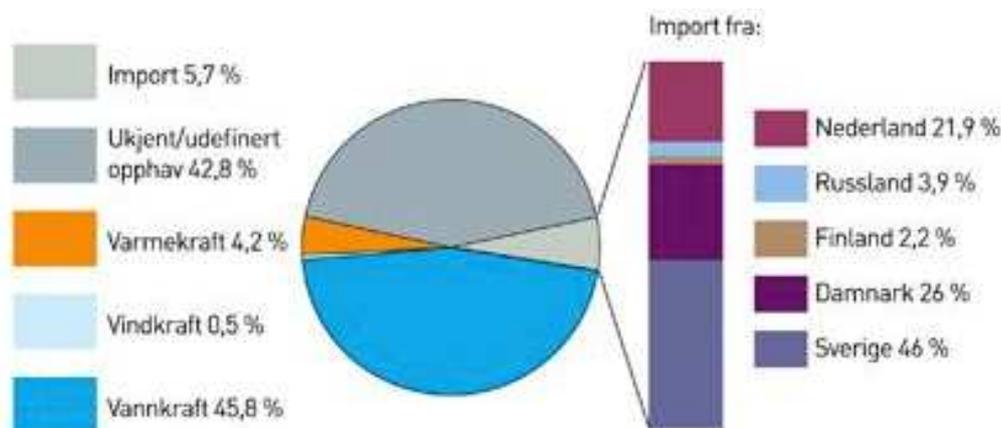
² "Organisation for Economic Co-operation and Development" (OECD) består av 34 land, og ble i 1961 opprettet for å stimulere økonomisk utvikling og verdenshandel.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

elektrisitet med oversikt over strømforbruk i Norge fordelt på energikilder og brutto import. Se Figur 5-3 og Figur 5-4 for varedeklarasjon for henholdsvis år 2008 og 2009.



Figur 5-3. Diagrammet viser en varedeklarasjon for elektrisitet med oversikt over forbruk i Norge fordelt på energikilder og brutto import i 2008. (Norges vassdrag- og energidirektorat, 2008)



Figur 5-4. Diagrammet viser en varedeklarasjon for elektrisitet med oversikt over forbruk i Norge fordelt på energikilder og brutto import i 2009. (Norges vassdrag- og energidirektorat, 2009)

Som Figur 5-3 og Figur 5-4 viser, er andelen fra vannkraft redusert fra 70 til 45,8 prosent, og andelen "ukjent opphav" økt fra 25 til 42,8 prosent. Det er under kategorien "ukjent opphav" mye av ikke-fornybar kraftimport gjemmer seg. Beregninger viser at fossil- og kjernekraftandelen i det norske strømforbruket ligger i størrelsesorden 33 og 19 prosent (Teknisk Ukeblad). Altså over halvparten av forbruket. Grunnen til dette er økende eksport av vannkraft. Den rene kraften Norge produserer byttes med kraftmiksen i det landet det selges til.

En ytterligere bekreftelse på den økende importen ble lagt frem under NVE sin ukentlige rapport om situasjonen i det norske kraftmarkedet, hvor direktoratet meldte om en nettoimport av elektrisk kraft på 569 GWh i uke 2 i 2011. Denne verdien tilsvarer strømforbruket i om lag én million husholdninger (Teknisk Ukeblad).

Disse tallene har stor relevans i forhold til denne rapportens tema og fokus på ventilasjon, en energipost i bygninger som i hovedsak dekkes av direkte elektrisitet.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Blant annet på bakgrunn av de ovennevnte internasjonale studiene, er det i Norge nå bred politisk og faglig enighet om at energieffektivisering må prioriteres. I følge Skandinavias største uavhengige forskningskonsern, SINTEF (T. Dokka et al., 2009), er det ikke bare viktig å prioritere, men også avgjørende for at Norge skal overholde de pålegg som gis gjennom EU sitt fornybar- og bygningsenergidirektiv (EPBD - Energy Performance of Buildings Directive). Et direktiv Norge sluttet seg til gjennom et vedtak i Stortinget i 2004. Grunnet fokuset på energieffektivitet, ble det i 2009 opprettet en arbeidsgruppe av Kommunal- og Regionaldepartementet (KRD). Dette er en arbeidsgruppe som jobber for å lage en handlingsplan for energieffektive bygg (Kommunal- og Regionaldepartementet, 2010). Arbeidsgruppen fremhever seks hovedområder som er viktig i arbeidet med energieffektivisering av bygg. Det første punktet på denne listen omhandler utvikling av trygge og robuste løsninger, for å sikre kvalitet på utførelsen av energiltak i bygg.

Det vil i denne rapporten legges vekt på å presentere løsninger for robuste, energieffektive og velfungerende behovstilpassede ventilasjonsanlegg, samt utvikle kravspesifikasjoner som setter krav til disse anleggene. En beskrivelse av dette arbeidet følger senere, se kapittel 8.8. Punkt tre i rapporten omhandler strenge krav til nybygg, som skal bidra til å utvikle nye energieffektive løsninger, men også i forhold til å overholde målene i EUs bygningsenergidirektiv om at det innen 2020 skal kunne bygges nybygg med tilnærmet nullenerginivå³. Arbeidsgruppen foreslår også energikrav til nybygg på passivhusnivå fra 31.12.2015.

"Rundt 40 prosent av netto innenlandsk sluttforbruk av energi i Norge er tilknyttet drift av bygninger" (T. Dokka et al., 2009). Det opereres også med tilsvarende tall for Sverige (Statens energimyndighet, 2007), Frankrike (Benezeth, Y. et al., 2011) EU og verden generelt (Laverge J, et al., 2011). Bygninger er derfor et viktig fokus området med tanke på å håndtere energi- og klimautfordringene. 40 prosent av den totale energibruken i Norge tilsvarer 80 TWh i 2009, i følge Lavenergiutvalget (Lavenergiutvalget, 2009). Tall fra 2007 viser at yrkesbygg⁴ står for ca. 45 prosent av energibruken til bygg (SINTEF, 2007), og hvis det legges til grunn en lik prosentvis fordeling for 2009, vil det resultere i et energibehov på 56 TWh for yrkesbygg i 2009.

I yrkesbygg er komfortventilasjon en energipost av betydelig størrelse. Energibruk til vifter alene utgjorde ca. 17 prosent av det totale energibehovet i den aktuelle bygningskategorien (Schild, 2009). Dette energibehovet har et betydelig forbedringspotensial, og kan reduseres blant annet gjennom effektivisering av aggregater, reduksjon og regulering av luftmengder og optimal design av anlegget. Vifteenergibehov er kun én del av energien som kreves for å ventilere et bygg. I tillegg kommer drift av selve luftbehandlingsaggregatet, herunder drift av varmegjenvinner, sirkulasjonspumper til varme- og kjølebatterier og drift av automatisering, samt oppvarming og kjøling av ventilasjonsluften. Alle disse energipostene utgjør ca. 40 prosent av det totale netto energibehovet for et kontorbygg oppført i henhold til Teknisk

³ Tilnærmet nullenerginivå tallfestes ikke i bygningsenergidirektivet, og er opp til hvert enkelt land å definere. KRD tolker dette til å tilsvare et bygg på passivhusnivå, dvs. et energibehov på 70-80 kWh/m²år i levert energi.

⁴ Yrkesbygg er et begrep for de 11 bygningskategoriene i TEK10 som er utover de to boligkategoriene, småhus og boligblokk.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Forskrift (TEK10). På bakgrunn av disse tallene er det ikke vanskelig å forstå at det kan spares mye energi og klimautslipp ved å jobbe med energieffektivisering av ventilasjonsanlegg, og at dette er et viktig område å arbeide med hvis målene om tilnærmet nullenerginivå skal realiseres.

Denne rapporten beskriver hvordan energibruk i ventilasjonsanlegg kan effektiviseres med henblikk på blant annet reguleringsprinsipper, krav og design, se kapittel 6.2. Men først vil det bli redegjort for betydningen av ventilasjon i seg selv. Dette er viktig å inneha god kunnskap om, for å forstå hvorfor reduksjon av luftmengder ikke nødvendigvis er et anbefalt tiltak i forbindelse med energieffektivisering.

Foruten reduksjon av klimautslipp, er energieffektivisering også av interesse for byggeiere fordi det vil holde utgiftene til bygningsdrift på et lavere nivå. I tillegg til ønsket om en miljøvennlig profil, kommer krav om energimerking. Samtidig er det en nødvendig vei å gå for å tilfredsstille fremtidige lover og forskrifter for energibruk, nå som byggekravene dreies over mot passivhus, lavenergibygging og såkalte "zero emission buildings"⁵.

Behovstilpasset ventilasjon er således basert på to fundamentale begrunnelser; både hensynet til de globale miljøutfordringer og derigjennom lovpålagte krav om energibesparelse, samt av hensyn til inn klima.

5.2 Hvorfor ventilere bygg?

Før det diskuteres hvilke muligheter som finnes og hvordan man kan redusere energibehovet til ventilasjonsanlegg, er det viktig å få et innblikk i hvorfor man ventilerer bygg, samt å forstå hvilke premisser og begrunnelser som ligger til grunn for de krav til luftmengder som gjelder i dag.

I USA har studier vist at mennesker oppholder seg omtrent 90 prosent av tiden innendørs, enten i hjemmet, på arbeidsplassen eller i skoler og institusjoner (EPA). Når mye tid brukes innendørs, får innemiljøet en stor betydning for et godt velbefinnende og en god helse. Det stilles i dag store krav til klimatiske betingelser for innemiljøet sammenliknet med bare få år siden. Da var også mennesker mer aktive når de oppholdt seg innendørs. Dessuten hadde boligene god utluftning gjennom mindre tette konstruksjonsprinsipper enn dagens byggeskikk, spesielt med tanke på passivhus og krav til tetthet i slike bygg. Når en person oppholder seg mye i ro, blir vedkommende mer følsom for innklimaparametere som temperatur, trekk, fukt og luftkvalitet, som igjen fører til at det stilles strengere krav til kvaliteten av klimaet. Selv om trivselen er god, kan allikevel et dårlig inn klima gå ut over både beboernes helse og livskraft. Et dårlig inn klima kan skape forverringer av sykdommer, selv om symptomene ofte kan være diffuse. Studier som viser sammenhengen mellom inn klima og helse beskrives i kapittel 5.2.1.

⁵ Zero Emission Buildings, også kalt Zero Energy Buildings (ZEB), er en populær betegnelse for bygg som produserer like mye energi fra fornybare energikilder tilbake til strømmettet, som bygget bruker av energi på årlig basis.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Inneklimate og innemiljø er i dag begreper som brukes om hverandre. Inneklimate er av verdens helseorganisasjon (WHO – World Health Organization) definert til det som omfatter termisk-, atmosfærisk-, akustisk-, aktinsk-, og mekanisk miljø. Begrepet innemiljø sammenfattes ved det som til daglig kalles de ”syv søstere”, noe som omfatter begrepene:

- **Det termiske miljø;** Temperaturforskjeller i rom, fuktighet, lufthastighet/trekk, bekledning og aktivitet.
- **Det atmosfæriske miljø;** Luftens sammensetning av gasser, konsentrasjonen av støv i luften og mikroorganismer.
- **Det akustiske miljø;** Støyproblemer og vibrasjoner.
- **Det aktiniske miljø;** Elektromagnetisk stråling, statisk elektrisitet og belysning.
- **Det mekaniske miljø;** Arbeidsrutiner, utstyr og inventars tilpasning på arbeid eller i hverdagen.
- **Det estetiske miljø;** Hvordan mennesket oppfatter miljøet rundt seg, utforming av lokalet, dagslys og utsikt.
- **Det psykososiale miljø;** Relasjoner mellom mennesker.

Ventilasjon henger sammen med ønsket om og behovet for et godt innemiljø, og er en viktig bidragsyter til mange av punktene over, spesielt de tre første.

Alle de ovennevnte parametrene har innvirkning på hvordan innemiljøet oppleves, og hvilke konsekvenser det har for helse og produktivitet.

Ventilasjon av yrkesbygg kan ha flere ulike hensikter, og som oftest er de sammenfallende. Bygg ventileres ikke bare ut i fra helse, produktivitets- og komfortsammenheng, men også i produksjonsøyemed gjennom forbrenningsprosesser. Ventilasjon i helse- og komfortsammenheng har som hensikt å tilføre oksygen for respirasjon og friskluftbehov, isolere, fjerne eller tynne ut lukter og skadelige forurensninger, samt bidra til temperatur- og fuktighetskontroll i rommene.

Forurensning av inneluft i et kontorbygg stammer normalt fra emisjoner fra følgende kilder:

- Mennesker og dyr, samt deres aktivitet og bekledning
- Byggematerialer og behandling av disse
- Innredning, møbler og annet kontorutstyr
- Teknisk utstyr
- Rengjørings- og vedlikeholdsmidler

Friskluftmengdekravene i Norge bestemmes etter TEK10, Arbeidsmiljøloven og NS-EN 15251 i forhold til byggets forurensningsnivå. På denne måten er det mulig å redusere luftmengdebehovet ved å dokumentere lavemitterende materialer og et lavt forurensende bygg.

Ny teknisk forskrift som ble utgitt i 2010 (TEK10) inneholder også et nytt krav rundt forurensning, som sier at *”Materialer og produkter skal ha egenskaper som gir lav eller ingen forurensning til inneluften”*. Dette er et meget viktig krav i kampen om å redusere skadelige forurensninger i inneluften. Det er bevist at lavemitterende materialer

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

kombinert med riktig utførelse, bidrar til å redusere mengden konsentrasjoner av skadelige forurensninger i inneluften, slik som karbonmonoksid (CO), totalt flyktige organiske forbindelser⁶ (TVOC) og ammoniakk (Tuomainen, 2003).

5.2.1 Ventilasjon, helse og produktivitet

Allerede på 1800-tallet ble det satt fokus på ventilering av bygg for å unngå sykdom. Sir Edwin Chadwick (1800-1890) stilte i sin rapport om sanitære forhold krav til blant annet riktig ventilasjon, tørre boliger og godt renhold (Chadwick, 1842). I nyere tid har det vært et økende fokus på innemiljø og helse. Det såkalte "Sick Building Syndrome" (forkortet SBS⁷) er velkjent, men samtidig er det lite presist. Det finnes i dag mye kunnskap om hvordan brukerne oppfatter miljøet i bygninger. Derimot er forståelsen rundt mekanismene bak innemiljøets påvirkningen på mennesker begrenset når det gjelder konkrete innemiljøfaktorer. Dette gjelder særlig når eksponeringen er lav. Det er foreløpig begrenset kunnskap om individuell sårbarhet og hvordan ulike faktorer i inneklimate har betydning for den enkeltes helse. I nyere tid har det vært flere studier om inneklimate med ulike perspektiver og fokusområder. Flere ser på sammenhenger mellom inneklimate og helse, mens andre studier presenterer sammenhenger mellom ventilasjon og smitte. Det er forsket en del på sammenhengen mellom luftmengder og konsekvenser for innemiljø, både i forhold til helseplager, sykdom, termisk komfort⁸ og produktivitet. For å underbygge og understreke behovet for tilstrekkelig ventilasjonsluftmengder i bygg, beskriver denne rapporten flere av disse studiene, og deres resultater.

Helse og komfort

Park et al. presenterte i 2006 resultater fra en tverrsnittundersøkelse med et stort antall eksponeringsmålinger der man så på sammenhengen mellom SBS-relaterte plager, som piping i pusten og tett, kløende og rennende nese relatert til konsentrasjonen av sopp i sedimentert støv⁹ (Park, JH. et al., 2006). Studien viser at antall SBS-relaterte tilfeller økte med en gjennomsnittlig faktor på 3,8 (variasjon 1,6-9,2) for piping i pusten, og 2,6 (variasjon 1,5-4,5) for tett og rennende nese. Andre studier (Bornehag, CG. et al., 2001) (Bornehag, CG. et al., 2004) (Fisk, WJ. et al., 2007) konkluderer med at fukt og sopp inne gir 30 til 50 prosent økt risiko for luftveissykdom og forverring av astma. Nyere studier som konsentrerer seg om utvikling av astma,

⁶ Totalt flyktige organiske forbindelser, TVOC, er en betegnelse for det totale nivået av organiske kjemiske forbindelser som kan påvirke miljøet og menneskers helse. Forbindelsene er både naturlige og menneskeskapt.

⁷ SBS (Sick Building Syndrome) er et begrep som blir brukt til å beskrive situasjoner hvor bygningens brukere opplever akutte helse- og komfortproblemer som synes å være knyttet til tiden brukt i bygget, men hvor ingen spesifikk sykdom eller årsak kan identifiseres. Symptomene er typisk rennende nese, tørre slimhinner, tretthet, hodepine, tørr hud, svimmelhet og konsentrasjonsvansker. (U.S. environmental protection agency)

⁸ Termisk komfort er en sinnstilstand der det uttrykkes full tilfredshet med de termiske omgivelser. Kilde: International Organization for Standardization. (1995). *ISO7730 - Moderate Thermal Environments- Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions For Thermal Comfort*. (ISO (International Organization for Standardization), 1995)

⁹ Sedimentert støv er depotstøv som samler seg på horisontale flater.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

konkluderer også i samme retning som de nevnte studiene. Kericsmar og J. Pekkanen viser med sine undersøkelser at det er god grunn til å tro at det er en årsakssammenheng mellom eksponering for fukt og muggsopp og luftveissykdom (Kericsmar, CM et al., 2006) (Pekkanen, J. et al., 2007). I Pekkanen sin case-kontrollstudie er det fire ganger så stor sannsynlighet for å utvikle astma hvis det er en høy mengde fukt og sopp i inneklimate. Verdens helseorganisasjon (WHO) konkluderer, på bakgrunn av blant annet nevnte studier, i sin oversiktsrapport fra 2009 at det finnes nok kunnskap til å si at det er en sammenheng mellom eksponering for fukt og sopp og utvikling av astma, og at det også fører tilforverring av astma.

Ventilasjon har en stor betydning for fukt- og temperaturkontroll i inneklimate. For å holde mengdene og konsentrasjonene av sopp og fukt på et lavt nivå, er det viktig med tilstrekkelige luftmengder i tilstrekkelig kvalitet.

Det finnes også flere studier som ser på friskluftmengder og dets betydningen for inneklimate direkte. I disse måles produktivitet, SBS-relaterte symptomer og sykefravær. Seppänen skrev i 1999 en oversiktsartikkel om sammenhengen mellom friskluftmengde og menneskelig respons (Seppänen, 1999). Artikkelen tok for seg tjue studier. De fleste av studiene viste til signifikant forverring av en eller flere helsemessige faktorer, eller negativ oppfatning av inneluftkvalitet når luftmengder var lavere enn 10 L/s per person. Noen av studiene konkluderte også med at det vil være ytterligere reduksjon i utbredelsen av SBS-relaterte symptomer, eller ytterligere forbedring i oppfattet luftkvalitet hvis man øker luftmengdene til 20 L/s per person. De aktuelle studiene rapporterte om en økning av luftveisproblemer og SBS-relaterte symptomer med en faktor på henholdsvis 1,5-2 og 1,1-6. Ingen av studiene hadde tilstrekkelige mengde data til å kunne konkludere med hvilke faktorer og konsentrasjoner som var avgjørende for resultatene, såkalt årsak-virkning sammenhenger. De fleste studiene var relatert til kontorbygg i moderate eller kalde klimaforhold. De har dermed relevans til tema for denne oppgaven, som har fokus på yrkesbygg i Norge.

O. Seppänen et al. fulgte i 2006 opp flere tidligere studier med en omfattende oversiktsartikkel om sammenhengen mellom friskluftmengde og menneskelig respons (Seppänen, O.A. et al., 2006). Formålet med studien var å samle den beste tilgjengelige litteraturen og kunnskapen som fantes, for å se på effekten av inneklimate i forhold til helse og produktivitet. På bakgrunn av litteraturstudiet ble det slått fast at det nå finnes tilstrekkelig data for å kunne trekke kvantitative relasjoner mellom luftmengde og korttids sykefravær, luftmengde og arbeidsprestasjon, oppfattet luftkvalitet og prestasjon, temperatur og prestasjon, og temperatur og SBS-relaterte symptomer. Studien viste også en relasjon mellom SBS-relaterte symptomer og arbeidsprestasjon.

Blant mer alvorlige helsemessige konsekvenser enn SBS-relaterte symptomer ved skadelige forurensninger i inneluften, kan det nevnes sammenhengen mellom radon¹⁰ og lungekreft. Case-studier fra Europa og USA (Darby, S. et al., 2006) (Krewski, D. et al., 2006) påviste en signifikant og tilnærmet lineær sammenheng mellom radon og lungekreft ned til eksponeringsnivå under det den gang anbefalte terskelnivået på 200

¹⁰ Radon er en usynlig og luktfri radioaktiv gass, som dannes kontinuerlig i jordskorpa etter henfalling/nedbrytning av uran.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Bq/m³. I 2009 reduserte Statens Strålevern denne grensen til 100 Bq/m³ i sine anbefalinger (Statens Strålevern, 2011). Undersøkelsen til Darby et al. konkluderte med at radongass i inneluften er årsak til ni prosent av alle dødsfall som følge av lungekreft. Anslagene er basert på en gjennomsnittlig radonkonsentrasjon i europeiske boliger på 59 Bq/m³. Gjennomsnittlig radonnivå i norske boliger er fastsatt til ca. 90 Bq/m³ (Statens Strålevern, 2011). Med samme beregningsmodell tilsvarer dette at ca. 14 prosent av alle nye lungekrefttilfeller i Norge har radongass som medvirkende årsak. Radonsperre og gasstett konstruksjon mot byggegrunnen, inkludert tette rørgjennomføringer i gulv og vegger kan være gode tiltak. Derimot vil aktiv eller passiv trykksenking av grunnen under bygget i de fleste tilfeller være mest hensiktsmessig for å hindre høye konsentrasjoner av radongass i inneluften. Dette innebærer at det trekkes luft ut av byggegropen og at radongassen føres ut over tak. Balansert ventilasjonsanlegg vil også bidra til en viss radonreduserende effekt, i følge Statens Strålevern (Statens Strålevern, 2011).

Luftbåren smitte

Det finnes også en rekke studier som ser på ventilasjonens rolle når det gjelder smitteoverføring mellom pasienter der noen er bærere av spesielle sykdommer. Dette ble spesielt aktualisert etter SARS-utbruddet i Sør-Kina i 2002. Det er i den siste tiden forsket en del på ventilering av blant annet sengeliggende pasienter (Nielsen, Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces, 2009), på luftbåren smitte fra bærere av sykdommer (Li et al., 2007), samt ventilasjon i flykabiner (Nielsen, Air Distribution in Aircraft Cabins Using Free Convection Personalized Ventilation, 2006). Studien til Li et al. i 2007 konkluderte med at det var sterke og tilstrekkelig bevis til å slå fast at det var en sammenheng mellom luftsirkulasjon i bygninger og spredning av smittsomme sykdommer. Studien konkluderte samtidig med at det ikke fantes nok data for å spesifisere luftmengden som må til for å spre smitte. Li et al. presenterte også tre år tidligere, i 2004, forskning som viste til at 138 mennesker ble smittet med SARS som følge av at avtrekksventilen i rommet til en smittebærer ikke fungerte til sin intensjon (Li et al., 2004). For å begrense denne oppgaven vil dette temaet ikke berøres ytterligere annet enn å informere om at dette også er et stort fagfelt innenfor ventilasjonens betydning for menneskers helse. Denne rapporten omhandler komfortventilasjon i yrkesbygg, gjennom behovstilpasset ventilasjon. I denne sammenheng vil det videre bli fokusert på å legge til grunn studier som beskriver luftmengder og hvilke konsekvenser dette har på komfort, helse og produktivitet.

Samtidig som det i dag, på bakgrunn av mye publisert forskning, er relativt sannsynlig at helsesyntomene tilbrukere i bygg, spesielt de forbundet med SBS, er forbundet med en rekke ulike inneklimatefaktorer som sopp, fukt, støv og andre forurensninger, finnes det også forskning som konkluderer med at det er de psykososiale miljøfaktorene alene gjennom dårlige arbeidsforhold som bidrar til økte symptomer (Marmot, 2006). Det finnes heller ikke studier som tilbakeviser betydningen av de psykososiale faktorene for innemiljøet, og sannsynligvis er det summen av både fysiske og psykiske faktorer som bestemmer hvordan mennesket oppfatter innemiljøet. På bakgrunn av dette kan det derfor ikke utelukkes at psykososiale faktorer alene kan bidra til et dårligere innemiljø, så her er det behov for ytterligere forskning, muligens med hjelp fra andre fagmiljøer innen medisin og psykologi, hvor de ulike faktorene blir isolert og målt. En studie fra

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Kjell Andersson i 2008 (Andersson, 2008) beskriver tenkemåter og noen av fagområdene som kan involveres for videreutvikle vår kunnskap om disse spørsmålene. For å oppnå vitenskaplig fremgang mener Andersson at SBS-begrepet bør unngås fordi dette ikke er en konkret medisinsk størrelse eller et avgrenset syndrom. Han foreslår at det heller bør fokuseres mer på klare symptomer, på eksponeringsmengder og på mulige årsaks- og virkningsforhold. Dessuten bør det inkluderes undersøkelsesmetoder fra medisin og funksjonsmålinger av ytelse gjennom nevropsykologisk testing. For å kunne kartlegge de konkrete faktorene kreves både objektive måleinstrumenter for helseeffekter og metoder for å simulere og avgrense spesifikke kilder til helseproblemene. Ved bruk av eksperimentelle studier i klimakamre, vil man kunne øke muligheten for å vurdere bestemte eksponeringseffekter under kontrollerte betingelser. Kliniske provokasjonstester kan dermed gjøre det mulig å klassifisere påvirkningene i medisinske begreper og undersøke resultater over tid på en vitenskapelig måte.

Selv om ulike studier viser at det ikke finnes sikre nok bevis for hvilke faktorer som fører til de ulike symptomene som faller innenfor SBS-paraplyen, finnes det i hvertfall nok forskning til at det med god grunn kan konkluderes med at tilstrekkelig friskluft er essensielt for å skape et godt innemiljø i bygg. På bakgrunn av dette, bør ikke reduksjon av friskluftmengder være en del av strategien og tiltakene som gjennomføres når det er snakk om energireduksjon i ventilasjonsanlegg. Det er viktig at brukernes helse og komfort står i førsterekke, dernest må det finnes måter å tilfredsstille dette kravet på, på en mest mulig energieffektiv måte.

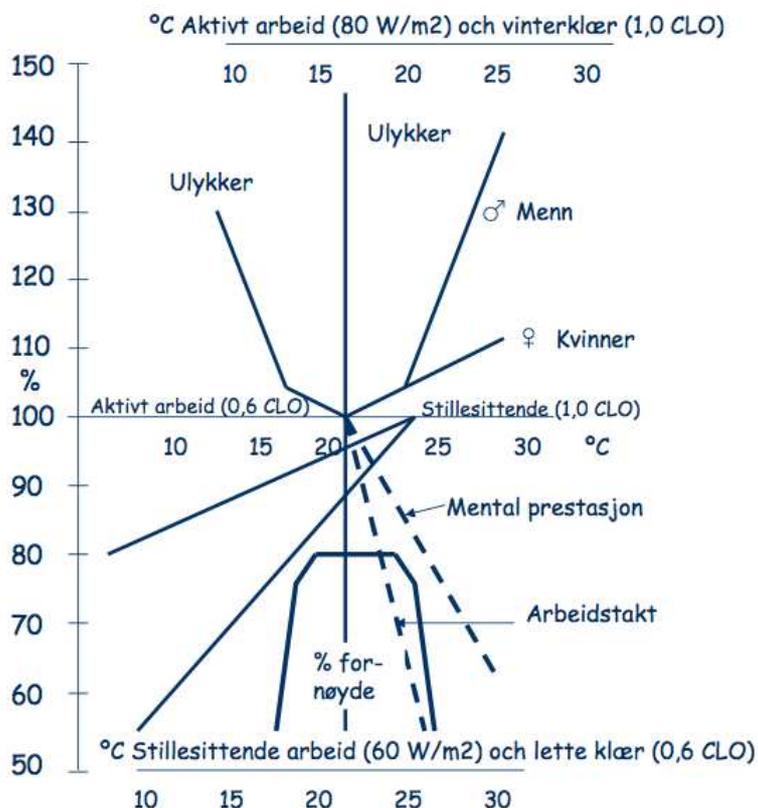
Produktivitet

Historisk sett har ventilering av bygg vært viktig i forhold til å bidra til et godt inneklima, i et helsemessig perspektiv. Nødvendige friskluftmengder ble bestemt på bakgrunn av erfaringer om hva som var tilstrekkelig for å fjerne forurensninger og å unngå akkumulering av fuktighet i konstruksjonen, og på den måten sørge for at konsentrasjoner av skadelige forurensninger var på et helsemessig lavt nok nivå. Fokuset på kun de helsemessige forholdene ble endret, da det i 1999 ble presentert studier som hadde forsket på sammenhengen mellom innemiljø og produktivitet.

Feltundersøkelser på den tiden viste at det var et betydelig antall misfornøyde brukere i mange bygg, blant annet brukere med SBS-relaterte symptomer, selv om gjeldende krav til inneklima var overholdt, og dette ønsket forskere å undersøke nærmere. Studier fra Wargocki et al. viste at forurensninger i inneluften og høy temperatur kunne redusere produktiviteten, i tillegg til eller i stedet for bare å ha negative følger for helse og komfort (Wargocki P., et al., 1999). Forsøkene ble fulgt opp året etter, hvor det kun ble fokusert på luftmengder, mens temperatur og fuktighet ble holdt konstant (Wargocki P., et al., 2000). I disse intervensjonsstudiene ble fem grupper á seks kvinner eksponert for tre ulike luftmengder, på henholdsvis 3, 10 og 30 l/s per person. Resultatene fra disse undersøkelsene viste at produktiviteten økte med et gjennomsnitt på 1,7 prosent for hver dobling av luftmengden. Disse studiene bidro til økt forståelse og kunnskap om fordelene ved å øke luftmengdene ytterligere i forhold til de luftmengder som var satt på bakgrunn av å holde luftforurensninger på et helsemessig lavt nivå. Samme året sammenlignet P.O. Fanger tre uavhengige studier som hadde dokumentert sammenhengen mellom inneluftkvalitet og positiv påvirkning på produktivitet hos

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

kontorarbeidere (Fanger, Provide good air quality for people and improve their productivity, 2000). Wyon forsket en del på sammenhengen mellom produktivitet og innemiljø på 70- og 80-tallet, og Figur 5-5 illustrerer på en god og oversiktlig måte hans funn rundt dette temaet.



Figur 5-5. Figuren viser en illustrasjon for sammenhengen mellom termisk komfort, produktivitet, mental prestasjon, prosentvis antall fornøyde og ulykker, fordelt på aktivt og stillesittende arbeid med ulik bekleddning. (Wyon, The effects of indoor climate on performance and productivity: a review, 1986)

Tette bygg

For å redusere energibehovet i nye bygg, stilles det stadig strengere krav til tetthet i bygningskroppen. Dette kan bidra til økt fuktighet i både konstruksjon og inneluft, med de konsekvenser det kan ha for muggsoppvekst. Som tidligere beskrevet er det funnet sammenhenger mellom fukt/muggsopp og økt risiko for luftveissykdom og forverring av astma (Bornehag, CG. et al., 2001) (Bornehag, CG. et al., 2004) (Fisk, WJ. et al., 2007).

På bakgrunn av de nye kravene til tetthet, vil det derfor ikke være noe mindre viktig med tilstrekkelig friskluftmengder og et fungerende energieffektivt ventilasjonsanlegg.

5.2.2 Lover og forskrifter

På bakgrunn av blant annet ovennevnte forsøk og studier som dokumenterer behovet for et godt innemiljø og nødvendig friskluft, er det både i lovverk og standarder tallfestet minimumskrav til frisklufttilførsel til å fjerne forurensinger som skyldes menneskers aktivitet og forurensinger som kommer fra bygningsmaterialer og inventar.

Under oppføring av byggverk i Norge gjelder flere lover og forskrifter, hvorav Plan- og bygningsloven (PBL) (Plan- og bygningsloven, 2010) og tilhørende Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK10) (Teknisk Forskrift, 2010) er de mest sentrale når det gjelder energieffektivitet generelt og ventilasjonsanlegg spesielt. For oppføring av byggverk som er søknadspliktige etter PBL, skal det også innhentes forhåndssamtykke fra Arbeidstilsynet. Samtykke vil bli gitt hvis krav angitt i Arbeidsmiljøloven blir oppfylt og det finnes tilstrekkelig dokumentasjon for dette. Kravene stilles gjennom Arbeidstilsynets *"Veiledning om Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen - 444"* (Arbeidstilsynet, 2006). Lovens formål er blant annet å sikre at *"arbeidsplasser er utformet slik at arbeidstakerne er sikret fullt forsvarlig inneklima med luft fri for helseskadelige, sjenerende eller belastende forurensninger"*.

I tillegg til lovpålagte krav er det også utarbeidet egne standarder for blant annet dimensjonering av luftmengder. Den europeiske standarden, NS-EN 15251:2007, som er implementert i Norge, setter krav til luftmengder for yrkesbygg med ulike forurensningsnivåer og ulike kategorier i henhold til forventet prosentvismisfornøyde, også kjent som "Predicted Percentage Dissatisfied" (PPD). Disse kravene er ikke lovpålagte, men presenterer anbefalte kriterier.

6 Hvordan ventilere bygg på en energieffektiv måte?

Ved hjelp av studier tidligere beskrevet i denne rapporten angående friskluftmengdens betydning for inn klima, komfort og produktivitet, i tillegg til lovpålagte friskluftmengdekrav, fastslås det at en reduksjon i dimensjonerende luftmengder, til verdier under anbefalte minsteverdier, ikke er veien å gå for å redusere energibruken i dagens ventilasjonsanlegg. Denne påstanden støttes av Laverge (Laverge J, et al., 2011). En bedre tilnærming er heller å fokusere på effektivisering av energibruken til ventilasjonsanlegg.

Selv om det er et ønske og en nødvendighet å redusere energibruken til ventilasjonsanlegg, er det essensielt at dette ikke går på bekostning av brukernes oppfatning av innemiljø og komfort, og ikke minst deres helse. Derfor er det viktig at tilstrekkelig friskluft blir tilført brukerne til rett tid og med tilstrekkelig kvalitet. Følgende tiltak kan bidra til energieffektive ventilasjonsanlegg uten å gå på bekostning av innemiljø:

1. Reguleringsstrategi – behovstilpassing av friskluftmengder
2. Strengere krav
3. Bedre design av kanalnett med tanke på lavt trykkfall og lav SFP-verdi
4. Energieffektive komponenter
5. Innregulering, prøvedrift og overlevering
6. Bedre driftsrutiner, overvåkning og oppfølging av anlegget

De to første punktene er beskrevet i dette kapittelet, og punktene 4-6 er beskrevet i kapittel 8.8. Punkt 3 som omhandler design av trykkfall i kanalnettet blir ikke dekket i denne rapporten grunnet begrenset tid, og er samtidig utførlig dekket i mye annen litteratur som gir tilstrekkelig kunnskap rundt dette temaet (Schild, 2009) (Mysen, Mads et al., 2000) (Blomsterberg, 2000) (Mäkinen, 2007).

6.1 Spesifikk vifteeffekt - SFP

I tråd med dagens fokus på energibesparelse i bygg- og anleggssektoren, er det fremmet ulike forslag for hvordan man kan redusere energibehovet i yrkesbygg i Norge. Energibruk til vifter i ventilasjonsanlegg er som tidligere beskrevet en vesentlig del av det totale energibehovet i et yrkesbygg, ca. 17 % (Schild, 2009), og har et betydelig forbedringspotensiale gjennom blant annet effektivisering av aggregater, reduksjon og regulering av luftmengder og optimal design av anlegget. Som et ledd i å effektivisere aggregatene og redusere energibruken til vifter, er det innført et begrep som kalles "Specific Fan Power" (SFP). SFP uttrykkes ved å dividere den elektriske effekten som kreves for å drive viften med den totale luftmengden som viften leverer. På den måten vil en såkalt SFP-verdi vise hvor mye elektrisk effekt viften trekker per luftmengdeenhet. Jo lavere denne verdien er, jo mer energieffektivt er ventilasjonsanlegget.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

For at denne SFP-verdien skal benyttes aktivt og tas hensyn til i byggebransjen, er dette implementert i Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK), hvor det er satt krav til en maksimal SFP-verdi på $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. Under prosjektering av ventilasjonsanlegg beregnes SFP-verdien ved å dividere anleggets trykkfall med den totale virkningsgraden for viftesystemet. For å bestemme anleggets trykkfall benyttes det i dag gjerne erfaringstall eller tall som er basert på beregninger i dataassisterte tegneprogrammer, og for å angi virkningsgraden støtter man seg gjerne på talldata fra aggregatleverandører. Det kan være betydelige usikkerheter tilknyttet disse tallene, og at forholdene i praksis kan gi høyere SFP-verdi enn hva som er beregnet iht. forskriftskrav.

For å finne ut om det er registrert avvik mellom teoretisk beregnet SFP-verdi og virkelig SFP-verdi på nyere ventilasjonsanlegg i Norge, og på den måten prøve å trekke noen slutninger i forhold til bransjens påstand om at behovstilpassede ventilasjonsanlegg ikke fungerer like godt i praksis, støtter denne rapporten seg på en tidligere upublisert litteraturstudie utført av masterstudent Magnus Wien Klæboe i 2010, som dekket dette avviket, hvorfor det eventuelt oppsto og i så fall i hvilket omfang.

Litteraturstudiet henviser til det som er relevant kunnskap om de praktiske aspektene ved SFP, var spesielt fire utgivelser som bemerket seg som både meget relevante, gode og troverdige. På bakgrunn av resultatene i de fire mest relevante artiklene, og resultatet av en omfattende litteraturstudie innenfor temaet, ble det konkludert med at det finnes lite forskningsstudier som tar for seg virkelig SFP-verdi i nyere tid i Norge. Det samme gjelder energiovervåking for ventilasjonsanlegg generelt. Energioppfølging av hele bygninger er blitt en vanlig driftsrutine, men overvåking og utskilling av de enkelte energipostene for seg selv er ikke normalt virker det som. Dette gjelder også de enkelte energipostene relatert til ventilasjonsanlegg, dvs. vifteeffekt, termisk energi til kjøle- og varmebatterier og elektrisitetsbruk til styrings- og reguleringskomponenter. Energieffektiviteten til behovstilpasset ventilasjon ser ikke ut til å være gjenstand for etterevaluering og overvåking i tilstrekkelig grad. Når det gjelder spørsmålet om det er registrert avvik mellom teoretisk beregnet SFP-verdi og virkelig SFP-verdi på nyere ventilasjonsanlegg i Norge, var det kun én studie som kunne besvare dette spørsmålet, dog uten det store grunnlaget. En masteroppgave fra 2008 omhandlet målinger av to nyere ventilasjonsanlegg i Oslo, hvor SFP-verdiene ble målt til henholdsvis $2,0$ og $2,66 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ (Fossen, 2008). Med et forskriftskrav på $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ vil det si at resultatene ikke utelukkende var positive, da det ene ventilasjonsanlegget lå 33 prosent over, mens det andre akkurat oppfylte kravet til SFP-verdi i forhold til TEK. To målinger er ikke nok til å trekke noen konklusjon over SFP-verdi i praksis for nyere anlegg i Norge, men det gir en indikasjon på hva man kan forvente seg. Rapporten ga heller ikke gode svar på hvorfor avviket oppsto.

Studier fra 90-tallet hadde målt SFP-verdier på mellom $2,8$ og $3,4 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, så i forhold til målingene fra 2008 har det vært en positiv utvikling, men rapporten presiserte at det var store usikkerheter rundt dette da grunnlaget var for tynt til å trekke noen slutning ut fra to målinger. Det er altså funnet avvik mellom teoretisk beregnet og virkelig SFP-verdi, men omfanget er ukjent. Det finnes veldig mye litteratur om hvor lav SFP-verdien kan bli og hvordan den kan oppnås, men det er ingenting som tyder på at dette blir videreført i praksis, annet enn at man må følge de kravene som er satt i tekniske forskrifter.

Målinger kan altså antyde at behovstilpassede ventilasjonsanlegg er mindre energieffektive i praksis, og kan til en viss grad underbygge påstandene fra bransjen, men her er det behov for omfattende målinger for å se på omfanget av dette, og ikke minst kartlegge bakgrunnen for eventuelle avvik slik at feil og unøyaktigheter kan elimineres i fremtiden.

6.2 Behovstilpasset ventilasjon

Det finnes mange ulike definisjoner for behovstilpasset ventilasjon, i denne rapporten defineres begrepet på lik linje med hvordan Maripuu (Maripuu, 2009) beskrev dette ventilasjonssystemet, etter forslag fra Fahlén (Fahlén, 2008). Fritt oversatt fra Maripuu:

"Et behovstilpasset ventilasjonssystem er et ventilasjonssystem med feed-back og/eller feed-forward kontroll av luftmengden i henhold til et registrert luftmengdebehov. Behovet er fastsatt på bakgrunn av et sett verdier som påvirker termisk komfort og/eller inneluftkvalitet. Hovedfaktoren for termisk komfort er de termiske forhold i form av temperatur og fuktighet (spesifikk entalpi). Hovedfaktoren for luftkvalitet er sammensetningen av luft i form av gasser, partikler etc. Ventilasjonsluftmengden reguleres i forhold til krav til luftsammensetning eller luftkvalitet. Dette er kjent som den hygieniske luftmengden. Variasjon i luftmengder kan reguleres enten av målt luftkvalitet (feed-back kontroll), målt tilstedeværelse (feed-forward kontroll) eller en kombinasjon av disse."

Behovstilpasset ventilasjon anses som en riktig løsning og nødvendig for å redusere energibehovet knyttet til ventilasjon (Grini, 2010). Tanken bak dette prinsippet er å minimere luftmengdene, samtidig som ønsket innemiljø opprettholdes. Dette gjøres ved at luftmengden varierer i takt med belastning og forurensningsproduksjon. Vanlige mekaniske ventilasjonsanlegg er designet for å levere nødvendige minimumsluftmengder ved dimensjonerende forhold, det vil si ved maksimal personbelastning. Luftmengdene er fastsatt på bakgrunn av de lover og forskrifter som setter krav til minimumsluftmengder per person, per gulvareal og materialet til dette og eventuelle aktiviteter og prosesser (Teknisk Forskrift, 2010). Det tilhører dog en sjeldenhet at samtlige rom har maksimal personbelastning til enhver tid innenfor driftstiden. Det vil si at det ofte blir tilført unødvendig mye luft til rom som ikke har full belastning. Det samme er tilfellet tidlig på dagen når forurensningen fra brukerne og deres aktiviteter ikke har oppnådd høye verdier. Dette er grunnet tidsavhengige og transiente forhold rundt oppbyggingen av forurensning i rommet, selv om det er maksimal tilstedeværelse. Resultatet av dette er følgelig høyere energibruk og større utslipp av klimagasser enn nødvendig, som følge av overventilering. Det er denne reduserte belastningen, i tillegg til den transiente effekten ved oppbygging av forurensning, hvor behovstilpassede ventilasjonsanlegg kan gi resultere i en energibesparelse.

Flere studier viser til at ulike bygg har relativt lav tilstedeværelse, selv under den normale driftstiden. Feltnmålinger av tilstedeværelsen i administrasjonsbygget i et universitet i Sverige, Gøteborg utført av Maripuu, viste at den maksimale tilstedeværelsen var på 0,7. Det vil si at 70 prosent av de overvåkede rommene var i bruk samtidig (Maripuu, 2009). Den gjennomsnittlige tilstedeværelsen ble registrert til

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

0,4. Dette er relativt lave tall, og det kan tenkes at dette ikke er representativt i forhold til andre yrkesbygg. Dette med tanke på at universitetsansatte ofte underviser i andre rom og ikke er like mye tilstedet i sitt kontor som andre yrker.

Studier som har undersøkt tilstedeværelsen i andre kommunale bygg i Sverige finner dog tilsvarende resultater som Maripuu. Johansson målte tilstedeværelsen i både et universitetsbygg, i industrikontorer og i et kommunalt bygg. Gjennomsnittlig tilstedeværelse for disse tre byggene var henholdsvis 32,9, 51,2 og 53,8 prosent for universitetsbygget, industrikontorene og det kommunale bygget (Johansson, 2005). Tilsvarende undersøkelser er utført i Norge av Halvarsson som har sett på kontorbygg, samt Mysen som har undersøkt undervisningsbygg. Halvarsson publiserte i 2005 en artikkel som baserte seg på målinger utført i et kombinert undervisnings- og kontorbygg hvor to ulike organisasjoner holdt til. Målingene viste en maksimal tilstedeværelse på henholdsvis 62 og 47 prosent for de to organisasjonene (Halvarsson, J. et al., 2005). I dette tilfelle er det verdt å legge merke til at det er snakk om maksimal og ikke gjennomsnittlig samtidighet. To år senere ble studiene fulgt opp med ytterligere to kontorbygg, hvor resultatene viste en gjennomsnittlig tilstedeværelse på 60 prosent (Halvarsson, J. et al., 2007). Undersøkelser fra 157 klasserom i Oslo viste at det gjennomsnittlige antallet elever var på 22, i lokaler som var dimensjonert for 30 elever. Klasserommene ble i snitt benyttet fire timer i løpet av dagen (Mysen, M. et al., 2005).

Ovennevnte studier viser at en lav tilstedeværelse er godt dokumentert i flere ulike bygningskategorier. Den gjennomsnittlige tilstedeværelsen varierer fra 40 til 73 prosent i studiene ovenfor. Dette er ikke belegg for å konkludere rundt en anbefalt verdi for å fastsette tilstedeværelse i et bygg, men studiene viser dog at bakgrunnen for å benytte behovstilpassede ventilasjonssystemer er solid og riktig.

Det er den reduserte tilstedeværelsen som fører til at behovstilpassede ventilasjonssystemer kan redusere luftmengdene og dermed har et vesentlig lavere energibehov enn ventilasjonssystemer med konstante luftmengder. Jo lavere tilstedeværelsen er, jo større energireduksjon kan oppnås. Det finnes flere studier som dokumenterer energibesparelsen ved bruk av behovstilpassede ventilasjonsstrategier i forhold til systemer med konstante luftmengder. De ulike reguleringsprinsippene som benyttes til å regulere luftmengder har også ulikt potensial for energireduksjon. Energibesparelsen for et behovstilpasset ventilasjonsanlegg avhenger av mange forhold, blant annet uteklime, luftmengdevalg, driftstider, reguleringsprinsipp, tilstedeværelse, bygningskategori, drift- og vedlikehold, samt type reguleringsparameter. Man skal derfor være forsiktig med å konkludere generelt når det gjelder energibehov for slike ventilasjonssystemer. Flere studier viser en trend i forhold til at disse systemene er mye mer energieffektive enn ventilasjonsanlegg med konstante luftmengder. I teorien kommer energibesparelsen i det øyeblikket tilstedeværelse er mindre enn dimensjonert luftmengde, med andre ord når samtidighetsfaktoren er mindre enn en. Følgende uttrykk kan beregne samtidighetsfaktoren (Mysen, M. et al., 2003):

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

$$s = o + b - (b * o)$$

hvor:

s er samtidighetsfaktoren. Faktoren uttrykker den samtidige luftmengden ved en gitt tilstedeværelse og baserate.

b er baseraten. Verdien finnes ved å dividere ventilasjonsluftmengden for et ubrukt rom med ventilasjonsluftmengden når det samme rommet er i bruk.

o er tilstedeværelsesfaktoren. Faktoren bestemmes ved å dividere antallet kontorer som er i bruk med det totale antallet kontorer i lokalet.

Uttrykket kan benyttes for å beregne hva energibehovet for ventilasjon vil bli for et behovstilpasset anlegg i forhold til et anlegg med konstant ventilasjonsluftmengde.

Når det gjelder dokumentasjon på energireduksjon, er det mange forskningsprosjekter som har undersøkt dette. Andrew Persily et al. simulerte seks ulike bygningstyper med syv ulike ventilasjonsstrategier, hvorav fire var satt opp med et CO₂-basert behovstilpasset ventilasjonsprinsipp (Persily, A. et al., 2003). Simuleringene resulterte i en årlig energireduksjon på 10 til 80 prosent avhengig av hvilke standarder som ble benyttet for å fastsette maksimums- og minimumsluftmengder, klima, tilstedeværelse og ventilasjonsstrategi. En annen studie viser til energieffektivisering ved bruk av behovstilpasset ventilasjon i en skyskraper i Hong Kong. Det ble utført undersøkelser i form av feltmålinger i en typisk etasje i dette bygget, hvor ventilasjonssystemet benyttet trykkregulering med konstant statisk trykk. På romnivå ble luftmengdene regulert med CO₂-sensorer, som før forsøkene ble kalibrert. Undersøkelsene viste at ventilasjonssystemet ville bidra til en energireduksjon i byggets totale energibehov på 55,8 % når man tok høyde for alle ventilasjonsrelaterte energiposter som varmebatteri, kjølebatteri og viftedrift (Sun, Z. et al., 2010). Andre studier bekrefter også en energireduksjon ved bruk av behovstilpasset ventilasjon (Persily, A. et al., 2004) (Taylor, 2007) (Mysen, M. et al., 2005) (Yang, Xue-Bin et al., 2010) (ASHRAE) (Phillips, 2006) (Stein, J. et al., 2007).

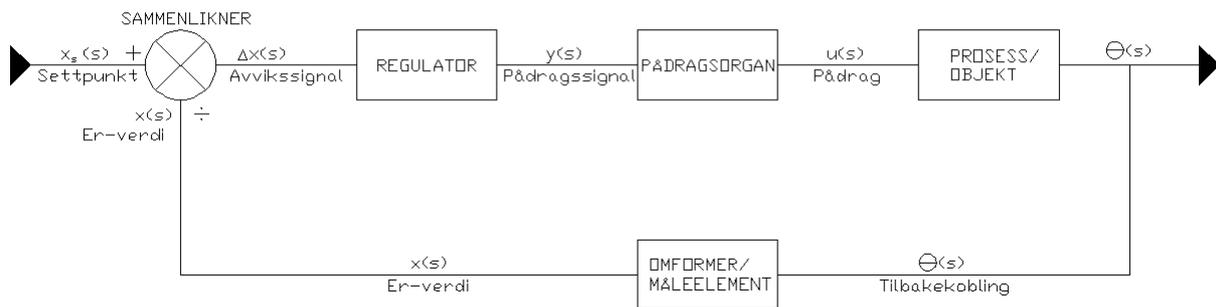
I forskriftssammenheng er det også fastsatt at energibehovet kan reduseres ved bruk av behovstilpasset ventilasjon. Denne energireduksjonen er mulig ved at man i forbindelse med dokumentasjon av bygningers energiytelse, kan tillate at luftmengdene reduseres til 80 prosent av dimensjonerende forhold ved bruk av behovstilpassede luftmengder, NS 3031.

Litteraturen over understrekes det at bruk av behovstilpasset ventilasjon vil bidra til å redusere byggets totale energibehov. I det påfølgende kapittelet vil det bli redegjort for ulike typer reguleringsprinsipper for slike ventilasjonsanlegg.

6.3 Ulike typer reguleringsprinsipper for behovstilpasset ventilasjon

Det finnes flere ulike reguleringsprinsipper innenfor behovstilpasset ventilasjon. Disse prinsippene innebærer ulike metoder for å regulere luftmengder og det er både fordeler og ulemper knyttet til hvert av disse systemene. En fellesfaktor er at de benytter en såkalt lukket reguleringsløyfe for regulering av luftmengdepådraget, se Figur 6-1.

En slik reguleringsløyfe innebærer at regulatoren i anlegget får et styringssignal fra en prosess. For behovstilpassede ventilasjonsanlegg vil prosess/objekt-boksen være luftmengden i kanalnettet. Omformer/måleenhet, vil være komponenten som registrerer om det har skjedd endringer i kanalnettet. Denne komponenten registrerer faktiske tilstand (er-verdi) og sender et signal til en sammenlikner, som undersøker forskjellen mellom er-verdien og den tilstanden som man ønsker (settpunkt-verdi) i det aktuelle tilfellet. Sammenlikner sender et eventuelt avvikssignal mellom er-verdi og settpunkt-verdi til regulatoren. Regulatoren beregner nødvendig justering av den luftmengden som må til for å opprettholde ønsket tilstand i kanalnettet. Pådragssignalet fra regulatoren sendes videre til pådragsorganet, som i dette tilfellet vil være en frekvensomformer og vifte som utfører eventuelle justeringer av luftmengder.



Figur 6-1. Bildet viser et blokkskjema av en lukket reguleringsløyfe. Tegningen er produsert i AutoCAD.

Videre følger en beskrivelse av de reguleringsprinsippene som er de mest benyttede systemene i Norge, og en sammenligning av disse. Beskrivelsen begrenser seg til de tekniske prinsippene, og økonomiske forhold er ikke dekket i denne oppgaven. Det finnes også andre systemer og reguleringsprinsipper som blir brukt i andre land, for eksempel bruk av omluft og "economizer", men disse vil ikke bli belyst videre i denne oppgaven (Nassif, N. et al., 2007).

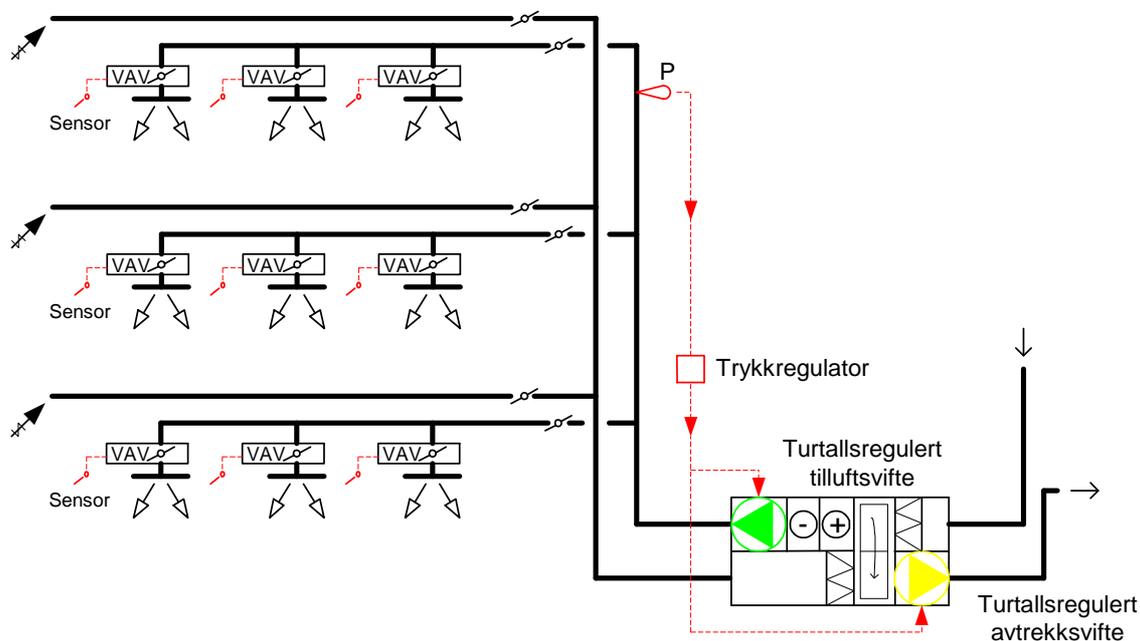
6.3.1 Trykkstyring

Behovstilpasset ventilasjon som reguleres etter trykkstyringsprinsippet, er i dag den mest vanlige metoden for å regulere luftmengder (Mingsheng Liu et al., 2007) (ASHRAE) (Taylor, 2007). I et slikt system er en trykksensor vanligvis plassert i tilluftskanalen på hovedtilførselen. Hovedtilførselen defineres i dette tilfellet som hovedkanalen i sjakt i systemer som benytter sentralisert plassering av luftbehandlingsaggregater. Ved desentralisert plassering av aggregatet defineres dette som hovedfordelingen ut til de aktuelle rom og lokaler.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Trykksensoren har som oppgave å registrere statiske trykkendringer som oppstår på bakgrunn av endringer av rom- og grenspjeldsposisjoner. Disse endrer posisjon som følge av behov for variasjon av frisklufttilførsel. Når endringer i luftfordelingen i kanalnettet er tilfelle, registrerer trykksensoren en endring i form av trykkdifferanse og sender dermed et signal videre til en regulator. Regulatorens oppgave er å beregne korrekt luftmengde for å opprettholde konstant statisk trykk der trykksensoren er plassert, et såkalt referansetrykk. Når trykksensoren registrerer et avvik fra referansetrykket, omformer regulatoren dette signalet og gir informasjon videre til en frekvensomformer, som igjen regulerer effektpådraget til viften.

Ved variasjoner i belastningen av rom eller soner, reguleres spjeldposisjonen til VAV-enhetene på bakgrunn av signal fra den aktuelle sensoren i rommet eller sonen. Endringen av spjeldposisjonene fører til variasjoner i kanalnettets trykkfall, som igjen påvirker det statiske trykket. Denne endringen registreres av en statisk trykksensor. Effektpådraget til viften endres så i takt med trykkfallet for å opprettholde konstant statisk trykk ved punktet hvor trykksensoren er plassert. Det valgte statiske trykket er basert på hvilket trykk som er nødvendig for å levere prosjektert luftmengde til det rommet eller sonen som har høyest strømningsmotstand ved full drift og full tilstedeværelse. Dette er prinsippet bak trykkstyring og Figur 6-2 viser en prinsippskisse av et slikt system. Som skissen viser er trykksensoren (markert med stor "P") plassert mot slutten av hovedkanalen, dette er en vanlig plassering basert på erfaringer av slike anlegg. Det er dog knyttet usikkerhet hvor god denne plasseringen egentlig er, da ingen publiserte artikler har kunne konkludert hvor sensoren skal plasseres. Dette er et av hovedtemaene i denne rapporten.



Figur 6-2. Figuren viser en systemskisse av behovstilpasset ventilasjonsanlegg basert på trykkstyring med konstant statisk trykk (Grini, 2010).

I ventilasjonsanlegg som benytter trykkstyring er det vesentlig med en god plassering av trykksensoren for å oppnå stabile driftsforhold og korrekte friskluftmengder. Sensoren må plasseres et sted det er stabilt trykk og en fullt utviklet hastighetsprofil. Ved

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

innregulering av anlegget kan det være problematisk og tidkrevende å finne korrekt trykksettpunkt for trykkføleren. Dette settpunktet er basert på en antatt kritisk vei (veien med størst trykkfall), som vil variere kontinuerlig i takt med belastninger i rom og soner. Det statiske trykket må være høyt nok til å dekke trykktapet for den kritiske vei ved maksimalt pådrag fra luftbehandlingsanlegget. Dette kriteriet har en innvirkning for energibruken og støynivå ved redusert drift (ASHRAE). Når luftmengdene reduseres, vil det ikke være nødvendig med det samme statiske trykket for å oppnå korrekt luftmengde gjennom kritisk vei. Dette trykket er som nevnt tidligere konstant, og fører til at VAV-spjeldene må strupe bort unødvendig trykk, som igjen fører til et høyere energibruk og et høyere støynivå fra VAV-enhetene enn nødvendig. Derfor er det vesentlig at det statiske trykket holdes så lavt som mulig for å redusere tapet av energi og holde støynivået ende (Engdahl, 2003).

En uheldig erfaring med trykkstyrte ventilasjonsanlegg er at reguleringsystemet ikke oppfatter små endringer i bruk av rom og soner, som fører til at luften kun blir omfordelt og luftmengden forblir uforandret. Dermed ingen energireduksjon. Dette fenomenet blir trolig større ved lav sensornøyaktighet, plassering av sensor, dårlig design av kanalnett og høy lekkasjefaktor (Mysen, M. et al., 2011).

I større ventilasjonsanlegg som dekker store arealer eller flere etasjer vil det være aktuelt med trykksensorer som regulerer VAV-spjeldene på grenkanalene i tillegg til trykksensoren i hovedkanalen, dette gjøres for å optimalisere reguleringen (Engdahl, 2003) (Mysen, M. et al., 2011). En slik utforming må i så fall ha individuelle regulatorer og grenspjeld som kommuniserer sammen og sørger for korrekte luftmengder til den aktuelle grenkanalen.

En fordel med trykkstyring er at det er mulig og kombinere VAV og CAV i samme kanalnett med samme reguleringsystem (Grini, 2010) (Mysen, M. et al., 2011). Designen av kanalnett bør da utformes slik at samtlige CAV-enheter er på en individuell gren, ellers må CAV-enhetene være i nærheten av der trykksensoren er plassert (Mysen, M. et al., 2011). Det er også et rimelig system som krever minimalt med installasjoner for regulering av luftmengder. Erfaringer fra slike ventilasjonsanlegg viser dårlig funksjon (Grini, 2010).

6.3.2 Trykkstyring med optimizer (Static Pressure Reset, SPR)

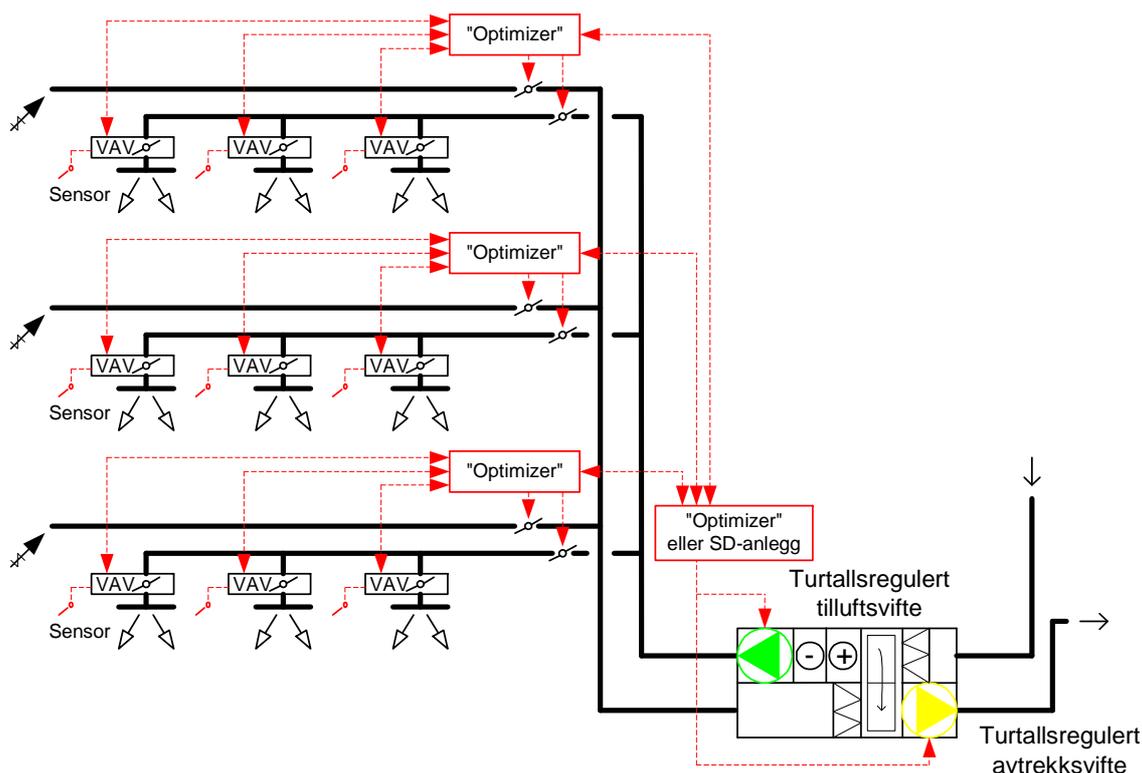
Regulering ved kontinuerlig innregulering blir også kalt trykkstyring med optimizer. Den engelske betegnelsen er "Static Pressure Reset - SPR". Denne type regulering går ut på at anlegget kontinuerlig tilstreber at samtlige spjeld er maksimalt åpne langs den kritiske vei, som er veien med høyest strømningsmotstand. Dette fører til at viftemotoren krever minimalt med energi på grunn av optimalt trykkfall. Følgelig varierer kritiske vei hele tiden, da spjeldposisjonen varierer i forhold til belastningen til de forskjellige rommene eller sonene. Dette fører til at anlegget kontinuerlig innreguleres og trykkfallet i anlegget blir så lavt som mulig.

Utformingen av slike reguleringsystemer er relativt avansert og innebærer full kommunikasjon mellom samtlige komponenter i kanalnett og aggregat. Romspjeldene

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

er VAV-spjeld som oftest regulerer med spjeldposisjon mellom 30-90 prosent åpning i forhold til maks (Grini, 2010). Disse spjeldene kommuniserer følgelig med sensoren(e) for det aktuelle rommet eller sonen, men kommuniserer også med en optimizer, som regulerer luftmengde i forhold til belastning av rom.

I større anlegg bygges reguleringsystemet hierarkisk med grenspjeld og optimizere som igjen kommuniserer med en optimizer som regulerer trykkfallet og viftepådraget. Figur 6-3 viser prinsippet bak et slikt system.



Figur 6-3. Figuren viser en systemskisse av behovstilpasset ventilasjonsanlegg som benytter resetting av statisk trykk til regulering av luftmengder (Grini, 2010).

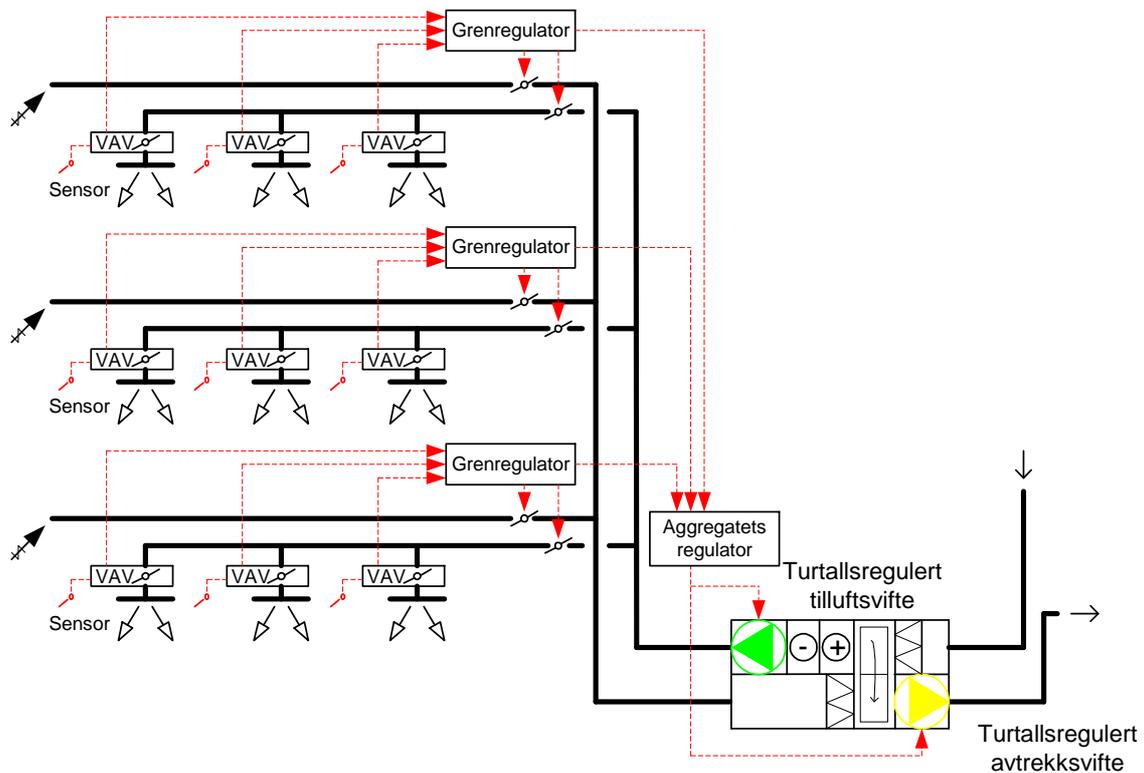
I mindre anlegg med få rom og soner, og dermed få VAV-spjeld, kan det benyttes kun en optimizer. Ulempen med en slik utforming er at det kan føre til at anleggets spjeld pendler mye og luftmengdefordelingen blir feil og uforutsigbar. Grunnen til dette er at optimizer fungerer best når den ikke har for mange signaler å beregne. Hvis mange spjeld er tilkoblet en reguleringsenhet, vil optimizere bruke lengre tid på å beregne korrekte spjeldposisjoner for riktige luftmengder. I anlegg med hyppige endringer i belastning, vil ikke spjeldene rekke å stille seg inn til riktig posisjon før luftmengdebehovet endres på nytt (Grini, 2010). Velfungerende trykkstyring med optimizer er det reguleringsystemet som vil gi den høyeste energireduksjonen for behovstilpassede ventilasjonsanlegg. Dette systemet er også det mest kostbare, grunnet ekstra komponenter og reguleringsorganer som brukes til å optimalisere VAV-spjeldenes posisjon. Kompleksiteten av et slikt anlegg kan også føre til at systemet er mindre robust og kan dermed føre til at ekstremtilfeller kan gjøre at systemer kan komme i ubalanse (Mysen, M. et al., 2011).

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Det vil være en god prosjekteringsstrategi og tilstrebe en kanaldesign som krever minst mulig statisk trykk. Ved lave statiske trykksettpunkter, vil viften kreve mindre effekt til å fordele riktige luftmengder, viften vil også kunne regulere ned til lave luftmengder uten at dette går utover virkningsgraden til vifte og motor. I tilfeller hvor anlegget har et høyt statisk trykksettpunkt, kan det forekomme tilfeller hvor viften må jobbe ved ugunstig lave turtall som kan føre til vibrasjon og støyprobatikk samt dårlig virkningsgrad til vifte og motor.

6.3.3 Mengderegulering (Digital Controlled Ventilation, DCV)

Mengderegulering blir også kalt digital behovstilpasset ventilasjon. Dette er et reguleringsprinsipp som er basert på kommunikasjon mellom sensorer og regulatorer ved hjelp av BUS-teknologi. Dette er et system som baseres på avlesning av ventilasjonsanleggets spjeld. Systemet er bygget opp hierarkisk, vanligvis over tre nivåer, som Figur 6-4 viser.



Figur 6-4. Bildet viser en systemskisse av behovstilpasset ventilasjonsanlegg med mengderegulering (Grini, 2010).

Hver enkel sone eller rom er utstyrt med relativt enkle av/på VAV-spjeld som innehar en enkel styringsenhet (Mysen, M. et al., 2011). Disse gir fastsatte luftmengder til rom eller soner. Luftmengder til rom og soner blir beregnet ved prosjektering og anlegget innreguleres slik at romspjeldene har fastsatte spjeldposisjoner som kun gir mulighet til maksimal eller minimal luftmengde. Spjeldene blir regulert av vanlige reguleringsparametere som temperatur, CO₂ og bevegelsessensorer. Sistnevnte har blitt

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

mest brukt. Styringsenhetene i av/på spjeldene sender signal til en grenregulator ved hjelp av en lokal BUS ledning.

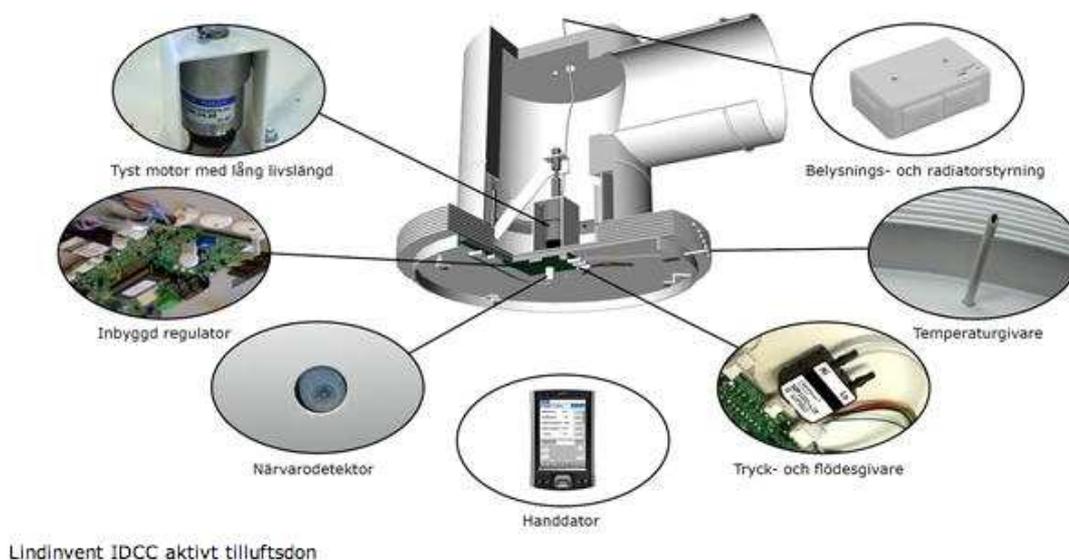
Grenregulatoren innehar en mikroprosessor og beregner luftmengden til den aktuelle grenen basert på av/på spjeldenes posisjon. Regulatoren sender et analogt signal (0-10V) til VAV-grenspjeldmotoren, VAV-enheten innehar integrert luftmengdemåler som stiller inn spjeldet i riktig posisjon. Grenspjeld- og tilhørende regulatorer er det andre nivået i anlegget.

Hver enkel grenregulator sender sine signaler videre til aggregatets regulator ved hjelp av enten LonWorks BUS eller analoge spennings signaler. Hvis anlegget benytter LonWorks BUS-system, summerer regulatoren alle luftmengdene fra de aktuelle grenregulatorene kontinuerlig og sender signalet til en frekvensomformer. Frekvensomformerer regulerer viften ved hjelp av en luftmengdemåler slik at anlegget får korrekt luftmengde. Hvis det benyttes analoge signaler (0-10V) til regulering av viftepådraget, må det gjøres en forhåndsprogrammering for hvilke motorfrekvenser som skal tilsvare antall åpne spjeld. Dette må utføres ved innregulering av anlegget. Det er fullt mulig å prosjektere rom med konstante luftmengder, da et slikt CAV-spjeld opptrer som et maksimalt åpent spjeld (Larsen, 2005). Et system som har VAV-enheter på romnivå med modulerende spjeldposisjoner er for tiden under utvikling (Mysen, M. et al., 2011).

6.3.4 Luftmengderegulering med variable tilluftsventiler (VAV diffusor)

Regulering av luftmengder ved hjelp av variable tilluftsventiler (VT) baserer seg på at samtlige komponenter som er nødvendig for regulering av luftmengder er integrert i tilluftsventilen. Med andre ord har ventilen innebygget VAV-spjeld, spjeldmotor, regulator og regulerings sensorer i en og samme enhet, se Figur 6-5. I de fleste slike ventiler, måles luftmengden ved hjelp av spalteåpningen på selve ventilen og det statiske trykket over ventilen. Den fungerer slik at utløpskonfigurasjonen varierer fra noen få prosent opptil 100 prosent åpning i forhold til belastningen til rommet eller sonen. Dette fører til en stabil og god kastelengde som igjen fører til at luften fordeler seg godt. Reguleringen av riktig luftmengde gjøres i ventilen, og det er derfor vesentlig å ha et stabilt trykk (20-50 Pa) på inngangen av ventilen for å få gode driftsvilkår. I og med at denne type system innehar samtlige komponenter til regulering av luftmengder i en og samme enhet, vil dette systemet være spesielt godt egnet til rehabilitering av ventilasjonsanlegg. Ved konvertering fra CAV til behovstilpasset ventilasjon er det kun nødvendig og bytte ventil og beholde kanalnettet uforandret. Slike endringer vil være vesentlig rimeligere enn konvertering til andre systemer for behovstilpasset ventilasjon. Regulering av hovedluftmengden baseres på samme prinsippet som trykkstyring, hvor det er installert en statisk trykksensor i kanalen (Maripuu, 2009).

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 6-5. Bildet viser hvordan en variabel tilluftsventil er konstruert (Lindinvent A/B).

I en studie rundt konvertering fra CAV til VAV på pekes det at det kun er nødvendig med variable tilluftsventiler, VAV-spjeld til avtrekket som blir styrt av tillufts-enheten og en regulator som sørger for kommunikasjon mellom VAV-enhetene (Mysen, M. et al., 2011). Maripuu har testet slike tilluftsventiler og mener et slikt system trenger grenspjeld som styres av en trykksensor for å opprettholde en konstant trykk på grenen for å oppnå gode driftsforhold (Maripuu, 2009). Hvis det skal prosjekteres et system som ikke benytter grenspjeld, må kanalnettet være trykkuavhengig og tilluftsventilene må kunne regulere under store trykkdifferanser (minst 100 Pa) ved maksimal og minimal luftmengder, uten at støypromblematikk forekommer. Når det gjelder luftmengdefordelingen må tilluftsventilene kunne levere korrekte luftmengder med korrekte kastelengder uavhengig av luftmengde, dette kravet stilles på bakgrunn av mulig trekkproblematikk.

Ved laboratorietesting av en spesifikk variabel tilluftsventil viste undersøkelsene til Maripuu at ventilen fungerte tilfredsstillende med tanke på luftmengdefordeling og trekkproblematikk. Det ble også utført feltmålinger på tre eksisterende anlegg. To av anleggene benyttet variable tilluftsventiler uten VAV-spjeld på grenkanalene. Disse to ble sammenlignet med et behovstilpasset anlegg som benyttet trykkstyring som reguleringsprinsipp. Resultatene viste at VT-systemet fungerte etter sin intensjon. Det var ingen trekkproblematikk og innklimaet var tilfredsstillende. Når det gjaldt støypromblematikk klarte alle tre anleggene å tilfredsstille lydkravet, som var 30 dB. De variable tilluftsventilene avga mindre lyd enn det trykkstyrte anlegget, selv ved høye trykkdifferanser over ventilen (ca. 100 Pa). De tre byggene tilfredsstilte SFP-kravet som er på 2 kW/(m³/s). Resultatene viste at byggene som benyttet VT-systemet var de mest energieffektive, med en bedre SFP-faktor enn anlegget med trykkstyring.

6.3.5 Sammenligning av de ulike reguleringsprinsippene

I et nyere forskningsprosjekt utført på universitetet i Nebraska, ble forskjellige behovstilpassede ventilasjonsanlegg sammenlignet og evaluert (Mingsheng Liu et al., 2007). Det ble gjort undersøkelser på tre forskjellige reguleringsystemer.

Det ble undersøkt to varianter av konstant statisk trykkstyring, det benyttet med trykkavhengige VAV-bokser og det andre med trykkuavhengige VAV-bokser. Det siste reguleringsystemet benyttet trykkstyring med optimizer for regulering (SPR) av luftmengder. Dette studiet ble utført med numeriske beregninger og simuleringer med fokus på energibruk til vifter, termisk energi og påvirkning på energibruk ved luftlekkasjer i kanalnettet. Beregningene og simuleringene ga godt samsvar med hverandre. De viste at energireduksjonen til viftedrift var høyest ved bruk av SPR og dårligst ved bruk av konstant statisk trykk med trykkavhengige VAV-bokser. Når det gjaldt de termiske energibesparelsene, bør det nevnes at undersøkelsene er gjort for klimadata fra Omaha, USA, som ikke er representativt for skandinaviske forhold.

Resultatene viste at SPR og regulering ved konstant statisk trykk med trykkuavhengige VAV-bokser kom likt ut, mens det siste reguleringsystemet hadde et høyere energibruk. Forskningen viste at luftlekkasjer også hadde en stor innvirkning på energibruk til vifter ved bruk av SPR. Ved ideelt system med ingen lekkasje, var energibesparelsen til viftedrift 15 prosent, mens besparelsen blir ytterligere 50 prosent ved en lekkasje på 30 prosent. Dette er resultater som det settes et spørsmålstegn ved.

Ved bruk av konstant statisk trykk viste undersøkelsene at den høyeste energireduksjonen til viftedrift var ved 55 prosent av dimensjonert luftmengde.

6.3.6 Ulike reguleringsparametre

Behovstilpassede ventilasjonsanlegg reguleres etter ulike behov. Dette behovet bestemmes ut ifra definerte verdier for den indikatoren som er valgt som styrende parameter. Indikatoren kan for eksempel være fukt, temperatur eller karbondioksid, disse opptrer gjerne også i kombinasjon. Denne rapporten begrenser seg til å fokusere på selve reguleringsprinsippet for ventilasjonsanlegg, samt ulike forhold inne i kanalnettet. Det er valgt å trekke systemgrensen ved overgangen kanalnett og romnivå, og se bort fra de forhold som påvirker ventilasjonsanlegget på romnivå. Dette kapitlet går derfor ikke i detalj på hvordan de ulike sensorene fungerer, men har til hensikt å gi en kort innføring i hvilke reguleringsparametre som finnes, hvilke som er mest brukt, og hva vi kanskje kan vente oss i fremtiden. Det vil ikke bli beskrevet forskjellige plasseringsstrategier eller hvilket vedlikehold de forskjellige sensorene krever. Det finnes i dag flere meninger om hvilke styringsparametre og sensortyper som fungerer best, men ingen entydig forskning på hvilke metoder som er de mest optimale, selv om flere sikter til bruken av CO₂-konsentrasjon som et godt prinsipp.

Til forskjell fra enklere VAV-systemer, hvor styringen eksempelvis er basert på en registrering av tilstedeværelse uten å ha kontroll på omfanget, vil et behovstilpasset ventilasjonsanlegg i de fleste reguleres på bakgrunn av en registrert last som gir informasjon om tilstanden i rommet. Det er derfor også valgt ikke å gå inn på styringsprinsipper som kun baserer seg på eksempelvis bruk av lysbryter, tidsur, enkle tilstedeværelsessensorer og andre typer som ikke gir informasjon om omfanget av tilstedeværelsen i rommet eller informasjon om det termiske inneklima eller luftkvalitet.

6.3.6.1 Karbondioksid (CO₂)

Karbondioksid (CO₂) er en reguleringsparameter som blir brukt i stor grad i nyere behovstilpassede ventilasjonsanlegg (Dougan, 2004) (Fisk, W.J. et al., 2010) (Maripuu, 2009) (Persily, A. et al., 2001). Bakgrunnen for bruken av denne gassen er viten om at vi mennesker utånder CO₂-gass, og at denne respirasjonen som oftest er hovedkilden til endringer av CO₂-konsentrasjon i inneluften i bygg. En overvåking av CO₂-konsentrasjon gir dermed en god indikasjon på om det befinner seg mennesker i de aktuelle rommene og oppholdssonene. Mengden utånding av CO₂ fra et menneske er forutsigbar basert på kjennskap til personens alder og aktivitetsnivå, og det kan på bakgrunn av dette stipuleres hvor mange som oppholder seg i rommet som ventileres. CO₂ er også en av de vanligste gassene i vår atmosfære. Som gass vil den også raskt oppløses og effektivt blandes i den omkringliggende luften (Schell, 2001).

Det er flere typer sensorer som har mulighet til å registrere eventuelle endringer av CO₂-konsentrasjon i luften.

Ved bruk av CO₂ som styringsparameter, gjør man ofte en antagelse om at CO₂-konsentrasjonen i uteluften ligger et sted mellom 400+/- 50 ppm (Schell, 2001). Slike systemer kan generere en feilkilde når den faktiske verdien av CO₂-innhold i uteluften avviker fra den antatte verdien. En mye bedre, men dog noe dyrere reguleringsmetode, vil være å benytte seg av en CO₂-sensor som registrerer den faktiske CO₂-konsentrasjonen i uteluften. Dermed har man mulighet til korrigere luftmengden etter

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

differansen mellom CO₂-konsentrasjon i ute- og inneluften. På den måten vil man unngå underventilering, og dermed dårligere innemiljø, eller overventilering, og dermed økt energibruk, som følge av feil.

Et viktig moment om begrensningen rundt CO₂ som styringsparameter, gjelder for bygg der luftforurensningen skyldes andre kilder enn CO₂-utånding ved tilstedeværelse. Det vil i slike tilfeller være nødvendig med bruk av andre typer sensorer eller tilleggssensorer som registrerer andre forurensninger som for eksempel emisjoner fra byggematerialer og møbler (Fisk, 1998). Det har blitt hevdet at så mye som 50 prosent av forurensning i en gjennomsnittlig kontorbygning blir generert av andre faktorer enn tilstedeværelse (Dougan, 2004). Det bør i den sammenheng nevnes at når rom ikke er i bruk og ventilasjonsluftmengdene til oppholdssonene blir regulert ned, blir de regulert til en minimumsluftmengde. Denne minimumsluftmengden er beregnet for å fjerne skadelige avgassinger og emisjoner fra interiør- og byggematerialer.

6.3.6.2 Karbonmonoksid (CO)

Karbonmonoksid (CO) er en meget giftig gass for oss mennesker, og uønsket i inn klimaet. CO produseres ved ufullstendige forbrenningsprosesser, gjerne fra trafikk, industri, røyking og matlaging. Etter at en lov om forbud mot røyking på serveringssteder og i offentlige bygninger ble innført i Norge i 2004, og stadig flere land forbyr røyking i offentlige bygg, er ikke tobakksrøyk en like stor trussel for inneluftkvaliteten som det en gang var. CO-sensorer er på bakgrunn av blant annet dette ikke mye brukt i yrkesbygg. Bruksområder for slike sensorer vil typisk være lokaler hvor slike gasser dannes ved forbrenning og aktivitet, eksempelvis verksteder og bilgarasjer. Det er heller ingen korrelasjon mellom menneskelig aktivitet og CO-konsentrasjon i vanlige lokaler hvor det ikke røykes (Sørensen B. , 2002).

6.3.6.3 Temperatur

Som tidligere beskrevet i kapittel 5.2.1, har temperatur innvirkning på komfort og produktivitet. Det er derfor ønskelig å ha kontroll på temperaturen i rommet. Temperatursensorer blir ofte brukt i behovstilpassede ventilasjonsanlegg, men da gjerne i kombinasjon med andre sensorer som registrerer eksempelvis bevegelse eller CO₂-konsentrasjon. Dagens temperatursensorer har liten måleusikkerhet, de fleste leverandører opererer med en usikkerhet på mindre enn 0,5 innenfor et måleområde på 0-50 °C (TROX Auranor).

6.3.6.4 Relativ fuktighet (RF)

Ventilasjonsluftmengden kan også reguleres etter ønsket relativ fuktighet¹¹ (RF) i rommet, det vil si at man registrerer både temperatur og fuktighet. Dette kan være aktuelt å regulere etter av flere grunner. Høy relativ fuktighet i luft kan for det første bidra til økt vekst av muggsopp med de konsekvenser det kan ha for utvikling og forverring av blant annet astma (se kapittel 5.2.1). I tillegg til at lave verdier under 20-30 prosent RF har sammenheng med SBS-relaterte symptomer som tørre slimhinner og såre øyne (Sørensen B. , 2002). For rom som brukes til oppbevaring av kunstgjenstander og lignende, er det også ønskelig å ha full kontroll på den relative fuktigheten i inneluften for å unngå skader eller kvalitetstap på objektene. For å måle relativ fuktighet finnes det flere ulike type sensorteknologier, med hver sine styrker og svakheter i forhold til kalibrering, måleusikkerhet, hysteresis etc. Selv om selve RF-sensorene er kjent for å være nøyaktige og responsive, finnes det svakheter med selve prinsippet rundt bruken av denne parameteren for å registrere tilstedeværelsen og omfanget av personer i rommet. En tredjedel av menneskers varmetap blir tilført omgivelsene som latent varme (fuktighet), men grunnet tidsforsinkelse, samt adsorpsjons¹²- og desorpsjonsegenskaper¹³, er det ikke noen direkte sammenheng mellom registrert RF-verdi og antall personer i rommet (Sørensen B. , 2002). Som reguleringsparameter er RF alene derfor ikke noen god løsning. Den er likevel viktig å ha kontroll på i forhold til konsekvenser av for lave eller høye verdier. Dette kan dog løses ved å registrere RF-verdien i tillufts- eller avtrekkskanalen og regulere denne ved hjelp av befuktere og/eller avfuktere som en del av luftbehandlingsanlegget.

6.3.6.5 Lukt

Luktesansen er en av våre mest primitive sanser, og mennesker har mulighet til å skille mellom 2.000-10.000 ulike lukter. Samtidig som vi kan registrere konsentrasjoner som er langt under det teknisk målbare (SINTEF, 2007). Luktesansen er i tillegg meget rask, men om lukten oppfattes som positiv eller negativ er subjektiv og avhenger av den enkeltes forhold til lukten.

P.O. Fanger presenterte i 1988 studier angående inneluftkvalitet og lukt, for på den måten å kvantifisere luftforurensningskilder og luftforurensning oppfattet av mennesker inne og ute (Fanger, Introduction to the Olf and Decipol Units to Quantify Air Pollution Percieved by Humans Indoors and Outdoors, 1988). Fanger introduserte en måle- og vurderingsmetode gjennom to ny enheter, olf og decipol. Hvor olf (kildestyrke) beskriver raten av emisjon av luftforurensning fra en standard person til omgivelsene. En standardperson er i dette tilfelles definerte som en stillesittende, voksen person i termisk komfort med omgivelsene og et gitt antall bad og undertøysskift hver dag.

¹¹ Relativ fuktighet er et mål på hvor mye vanndamp det er i luften ved en bestemt temperatur, og angis gjerne i prosent i forhold til hvor mye vanndamp luften maksimalt kan holde ved den aktuelle temperaturen (SNL).

¹² Adsorpsjon fysisk prosess der molekylene til et flytende eller luftformig stoff bindes til overflaten av et fast stoff (SNL).

¹³ Desorpsjon er frigjøring av gass som er løst i væske, og hvor gassen tas opp i gass som er i kontakt med væsken (SNL).

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Decipol (opplevd luktnivå) kvantifiserer konsentrasjonen av luftforurensning som oppfattes av mennesker. Luktsensorer var mangelvare under forsøkene til Fanger, så det ble benyttet luktpaneler bestående av trente personer på området. Lukt er som beskrevet en subjektiv opplevelse, men resultatene fra det nevnte panelet ble sett på som så objektiv som mulig.

Hensikten med introduksjonen av olf og decipol var å innføre en ny metode for å beregne nødvendig friskluftmengde og opplevd forurensningsnivå. Tanken er også at andre forurensningskilder enn mennesker kan kvantifiseres i forhold til olf-enheten. For å omdanne dette i praksis er det utarbeidet emisjonsverdier i olf for ulike bygningsmaterialer og andre forurensningskilder. Metoden ble kritisert av Aizlewood, som mente at det var svakheter i både teorien og metodikken (Aizlewood, C.E. et al., 1996). Aizlewood anbefalte å gå vekk fra bruken av olf og decipol for å bestemme nødvendige friskluftmengder. Til tross for dette er Fangers metode fortsatt i bruk i flere nordiske land.

Bruken av lukt som reguleringsparameter har visse begrensninger og utfordringer, men kan også være godt egnet for å stipulere persontetthet og aktivitet i rommet. Studiene fra Fanger indikerer at emisjoner fra mennesker står for under en tredjedel av den totale luktforurensningen, og er avhengig av antall personer og aktivitet. Emisjoner fra bygningsmaterialer, installasjoner og eksterne kilder kan i mange tilfeller settes konstant. Ved å måle decipol-nivået i rommet med en sensor og sammenlikne denne med en fastsatt skal-verdi, kan tilført luftmengde reguleres. Ulempen med dette prinsippet er at dagens luktsensorer har flere svakheter og begrensninger. Det finnes flere lukter som ikke sensorene klarer å fange opp, og det er vanskelig å bestemme hvilke lukter som skal være bestemmende. Det er også vanskelig å bestemme hvilken styrke utsignalene fra sensoren til regulatoren skal ha. Den menneskelige nese er overlegen når det kommer til å registrere lukter, og det har i lengre tid vært et mål om å utvikle såkalte "kunstige neser", uten at resultatene har vært spesielt gode. Studier fra 2008 viser dog at det er fremgang i teknologien og at regulering med tanke på luktsensorer virker lovende for fremtiden (Röck, F. et al., 2008).

6.3.6.6 Flyktige organiske forbindelser - VOC (Volatile Organic Compounds)

I inneklimasammenheng er flyktige organiske forbindelser (VOC) en fellesbetegnelse for organiske karbon- og hydrogenbaserte forbindelser som avgasser fra ulike materialer, utstyr og prosesser i rommet. Studier utført av Ekberg i 1994 konkluderte også med at differansen mellom utendørs og innendørs totale VOC-verdier var dobbelt så stor i arbeidstiden i forhold til om natten. Dette indikerer at avgassing av VOC ikke bare kommer fra byggevarer og andre interne kilder (Ekberg, 1994). Inneluften kan bestå av flere hundre VOC (over 300 er identifisert), hvor flere titalls finnes i registrerbare konsentrasjoner (Fisk, 1998). Selv om disse finnes i svært lave konsentrasjoner, er VOC sett på som en betydelig faktor for inneklimate i et bygg. Det er derfor rettet større fokus på VOC som en reguleringsparameter. Kunnskapen om sammenhengen mellom VOC og inneklimakvalitet er dog ikke tilstrekkelig, og VOC er sannsynligvis ikke en direkte årsak til SBS-relaterte symptomer på bakgrunn av de meget lave konsentrasjonene som finnes i inneluften (Sørensen B., 2002). VOC kan bidra til å frigjøre kjemiske reaktive radikaler

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

og irritanter til inneluften når disse organiske forbindelsene reagerer med andre organiske forbindelser eller kjemiske stoffer.

En "state of the art"-artikkel konkluderer dog med at eksponering av VOC over lang tid fører til SBS-relaterte symptomer, men har ingen informasjon vedrørende hvilke konsentrasjoner som må til før symptomene kommer (Shaobin Wang, 2007). Artikkelen ser heller ikke på hvordan denne parameteren kan registreres ved hjelp av sensorer, men fokusere på måter å fjerne disse organiske forbindelsene ved hjelp av luftrensing.

VOC-sensorer registrerer enten den relative konsentrasjonen av nivået for blandede gasser i forhold til inneluften, eller den totale VOC-konsentrasjonen (TVOC). VOC-sensorer krever lite vedlikehold og er billigere enn CO₂-sensorer, men i motsetning til CO₂-sensorer er de lite egnet for å registrere antall personer i rommet (Lagoudi, A. et al., 1996). VOC-sensorer er også følsomme for fuktighet, temperatur og forurensing i uteluft, men er til gjengjeld meget responsive for tobakksrøyk og andre forbrenningsgasser. For å registrere både personlast og skadelige forbrenningsprosesser og avgassinger, kan det derfor være interessant å kombinere CO₂- og VOC-sensorer.

6.3.6.7 *Kombinerte*

Som nevnt ovenfor kombineres gjerne de forskjellige reguleringsparametrene. Man har da kontroll på forskjellige variabler som opptrer i et bygg og dermed bedre kontroll på hvilken luftmengde som bør tilføres. I en studie som omhandlet bruk kombinasjon av CO₂- og temperatursensor for å regulere tilluftsmengden av friskluft, ble det utført feltnålinger i et møterom. Målingene viste at temperatur var den styrende faktoren, selv med lave internlaste (Maripuu, 2009). En slik studie påpeker viktigheten ved å ha kontroll på flere variabler ved regulering av luftmengder i bygg.

6.3.6.8 *Ny teknologi og fremtiden*

Det forskes og utvikles i dag på ny teknologi innenfor tilstedeværelsessensorer. Vanlige tilstedeværelsessensorer registrerer kun om det er personer i rommet ved hjelp av infrarød teknologi. Den nye teknologien som er under utvikling har til hensikt å kunne telle antall personer i rommet og samle inn informasjon om aktiviteten (Benezeth, Y. et al., 2011). Til dette er det tiltenkt å benytte videoanalyse med statiske kameraer. Studien til Benezeth presentere algoritmer som kombinerer bakgrunnsubtraksjon, sporing og gjenkjennelse for å få til dette. Evalueringen av den foreslåtte sensoren viser at deteksjonsraten ligger på hele 97 prosent.

7 Metoder

7.1 Litteraturstudier

Det ble utført ulike litteraturstudier i starten av prosjekt, for å undersøke status og å samle informasjon om de aktuelle temaene. En systematisk gjennomgang av publisert forskningslitteratur i nyere tid ble benyttet for å se på hvilken kunnskap og problemstillinger som foreligger, samt få en oversikt over "state of the art" og hva som kreves av forskning videre. Det ene litteraturstudiet omhandlet behovstilpasset ventilasjon, i forhold til ulike reguleringsprinsipper, reguleringsparametre og generell teori.

For å bygge opp under behovet for pålitelige ventilasjonsanlegg og nødvendige friskluftmengder, ble det også utført en litteraturstudie om sammenhengen mellom luftmengder og helse, komfort og produktivitet.

I forbindelse med litteraturstudiene ble det konstruert noen søkeord som var aktuelle for oppgaven, og ordene ble kombinert på en slik måte at unyttige artikler ble filtrert bort. Søkene ble foretatt på både Science Direct, Google Scholar og Høgskolen i Oslo sin database. I tillegg til å gjøre egne søk, ble kildene til de relevante artiklene undersøkt, og noen av disse ble valgt å benytte videre i litteraturstudiet.

For å sikre at litteraturen man benyttet seg av og støtte seg på i prosjektet var gode og relevante, var det viktig å analysere litteraturen med tanke på innhold, troverdighet, etikk og metodebruk. I første omgang ble det lagt vekt på å samle inn mest mulig relevant stoff på bakgrunn av valgte søkeord, for så å få en oversikt over artiklene ved å undersøke tittel, samt lese innledning og sammendrag. Deretter ble de utvalgte artiklene analysert i større grad med tanke på hvilke av disse som ville kunne brukes videre i oppgaven, samt hvilke artikler som hadde liten nytteverdi. Under innhenting og validering av artikler, ble disse samlet i et eget skjema for å ha oversikt over hvilke artikler som ble analysert og hvilken vurdering disse fikk i forbindelse med relevans og validitet. Skjemaet er vedlagt denne rapporten (vedlegg 1).

7.2 Beregningsverktøy

Et fokus tema i oppgaven var å undersøke optimal plassering av trykksensor, luftmengdefordelinger og nødvendig autoritet på spjeld. I tillegg til å utføre et litteraturstudie rundt dette, ble det produsert et regneark for å beregne trykkforhold og trykksvingninger i et kanalnett. Selv om det i dag finnes simuleringsprogrammer som kan beregne trykkforhold og luftmengdefordeling, lykkes det ikke gruppen å finne programmer som kunne låse statiske trykk for dermed å simulere ulike sensorplasseringer. Det ble derfor valgt å produsere et eget regneark for dette formålet. Dette ble gjort både for å ha kontroll på oppbyggingen og begrensningene, samtidig som det var et ønske om å lære seg matematikken og formelverket bak slike beregninger. I utgangspunktet ble det bestemt at MathCAD alene skulle benyttes som regneprogram

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

oppgaven, men problemer midtveis i prosjektet førte til at det ble nødvendig å bygge opp regnearket i Matlab. De to matematikkprogrammene ble valgt på bakgrunn av popularitet, brukervennlighet og avanserthet, og ikke minst tilgang på Høgskolen i Oslo, hvor store deler av oppgaven er produsert.

MathCAD er et mye mer visuelt egnet regneprogram enn Matlab, så i stedet for å kaste det arbeidet som allerede var utført i MathCAD, ble det valgt å jobbe videre med begge programmene parallelt. Og dermed å benytte Matlab til å utføre beregninger og MathCAD til å visualisere og dokumentere prosessen på en mer forståelig måte for de som ikke er så kjent med programmeringsspråket i Matlab.

Litteraturstudiet omfattet blant annet artikler basert på ulike metoder for å beregne strømnings- og trykkforhold i kanalnett. Noen av disse ble benyttet under oppbyggingen av regnearket som ble utviklet. Formelverket skrevet av Dr. ing Bjørn R. Sørensen (Sørensen B. R.) dannet algoritmen for beregninger av luftmengdefordeling i beregningsverktøyet. I tillegg ble det benyttet formler fra andre kilder for å ta høyde for hastighetsavhengige enkeltmotstander, som T-bend og innsnevninger.

I litteraturstudiet ble det undersøkt om enkeltmotstandsverdier varierte i forhold til Reynoldstallet. Litteratur viste at det er en variasjon av denne faktoren i forhold til Reynoldstallet, men at det ikke er tilstrekkelig data og forskning på dette området til å si noe helt konkret (Koch, 2006). Gruppen fikk tilgang på et regneark fra Lindab, dette regnearket så på variasjoner av forskjellige typer enkeltmotstander i forhold til både hastighet og Reynoldstall. Dette regnearket ble undersøkt grundig og det viste seg at forskjellen mellom hastighets- eller Reynoldsavhengige enkeltmotstander ikke hadde en stor innvirkning (se vedlegg 23). Av denne grunn, avgjorde gruppen at beregninger av enkeltmotstander ble gjort i forhold til hastigheter, hvor det finnes mye god litteratur og formelverk.

Videre følger en beskrivelse om hvordan regneverktøyet ble bygget opp og hvilke funksjoner dette innehar.

7.2.1 Oppbygging av regneverktøyet

Regneverktøyet som ble produsert i Matlab består av en hovedalgoritme med tilleggsfunksjoner. Hovedalgoritmen gjør det mulig å velge en bestemt plassering av den statiske trykkføleren og styre hovedluftmengden for å opprettholde konstant statisk trykk der den er plassert. Forskjellige scenarioer ble gjennomført ved å stenge ulike kanaluttak og justere luftmengden sentralt ved å tilstrebe et konstant statisk trykk, der dette ønskes konstant. Ved å utføre beregninger av strømningsforhold i ulike kanalnett i forskjellige scenarioer, ble det mulig å kartlegge luftmengdene i de forskjellige uttakene, ved ulik plassering av trykksensor.

Tilleggsfunksjonene i regneverktøyet går ut på å beregne luftmengdefordelinger og statiske trykkvariasjoner i kanalnettet. Fremgangsmåten for dette vises i kapittel 7.2.3.

7.2.2 Beregninger av luftmengder – innregulering

Innledningsvis i dette regneverktøyet beregnes luftmengdefordeling i kanalnettet. I disse beregningene blir det tatt høyde for strømningsmotstand i kanalstrekene i forhold til aktuelle hastigheter. På bakgrunn av varierende strømningsmotstand i kanalstrekene og dermed ulik luftmengdefordeling i de forskjellige uttakene, blir spjeldene justert. Med dette menes hvilket trykkfall som må legges over de aktuelle spjeld for å få ønsket luftmengde ut de forskjellige uttakene. Utgangspunktet for disse beregningene går ut på at man velger forskjellige variabler til det aktuelle ventilasjonsanlegget. Disse variablene er lengder og dimensjoner på kanaler, hvilke enkeltmotstander som vil inngå, hva slags type kanaler som vil bli brukt og lignende.

Hovedluftmengden (Q_0) som beregnes på bakgrunn av ønsket luftmengde i de forskjellige uttakene (Q_i) settes som en første hovedluftmengde. Videre gjøres det samme for samtlige kanaluttak, bortsett fra luftmengden i siste uttak. Luftmengden i siste uttak beregnes ut ifra kontinuitetsligningen:

$$Q_n := Q_0 - (Q_1 - Q_2 - Q_3 \dots - Q_{n-1})$$

Hvor:

- Q_n = Luftmengden i siste kanaluttak [m^3/s]
- Q_0 = Hovedluftmengden [m^3/s]
- Q_{n-1} = Luftmengden i nest siste kanaluttak [m^3/s]

På bakgrunn av at friksjonskoeffisienten (λ) og enkeltmotstandene (ζ) er avhengig av henholdsvis Reynoldstall og hastighet, må de sistnevnte variable beregnes først. Hastigheten beregnes ved hjelp av følgende ligning:

$$v_n := \frac{Q_n}{A_n}$$

Hvor:

- v_n = Lufthastigheten, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [m/s]
- Q_n = Luftmengden, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [m^3/s]
- A_n = Tverrsnittsarealet, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [m^2]

Reynoldstallet beregnes ved hjelp av uttrykket:

$$Re_n := \frac{(v_n \cdot d_H)}{\nu}$$

Hvor:

- Re_n = Reynoldstallet, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket
- v_n = Lufthastigheten, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [m/s]
- d_H = Hydraulisk diameter, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [m]
- ν = Kinematisk viskositet [m^2/s]

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Når Reynoldstallet er beregnet blir friksjonskoeffisienten funnet ved hjelp av ligning:

$$\lambda_n := \frac{1}{\left[1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re_n} + \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot d_n} \right)^{1.11} \right]^2 \right]}$$

Hvor:

λ_n = Friksjonskoeffisienten, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket

Re_n = Reynoldstallet, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket

ε = Kanalruheten settes mellom 0,1-0,2 [mm]

d_n = Kanaldimensjonen, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [mm]

Enkeltmotstander (ζ) i ventilasjonsanlegg varierer fra anlegg til anlegg. I beregningene som har blitt gjennomført er det kun tatt høyde for t-stykker, bend og innsnevring.

Hovedkanal:

$$\zeta_n := \left[0.35 \cdot \left(\left| \frac{v_{n+1}}{v_n} - 1 \right| \right)^{1.5} \right] + \left[0.15 \cdot \left[1 - \left(\frac{A_{n+1}}{A_n} \right) \right] \right]$$

Det første leddet er enkeltmotstandsberging av et t-stykke (Engdahl, 2003), mens andre ledd i formelen er enkeltmotstand på grunn av innsnevring av kanaldimensjon. Formlene til enkeltmotstandsverdiene for innsnevringene er hentet fra litteraturen bak et beregningsprogram kalt DDS-CAD VVS, utviklet av Data Design System (System).

Hvor:

ζ_n = Enkeltmotstanden i det aktuelle kanalstrek i hovedkanal, hvor indeks n definerer den aktuelle enkeltmotstanden

v_{n+1} = Hastigheten etter t-stykket, hvor indeks n definerer det aktuelle t-stykket [m/s]

v_n = Hastigheten før t-stykket, hvor indeks n definerer det aktuelle t-stykket [m/s]

A_{n+1} = Arealet etter innsnevring, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [m²]

A_n = Arealet før innsnevring, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [m²]

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Uttakskanal:

$$\zeta_n := 0.52 \left(\frac{v_{nu}}{v_{nh}} - 0.55 \right)^{1.5} + 0.90$$

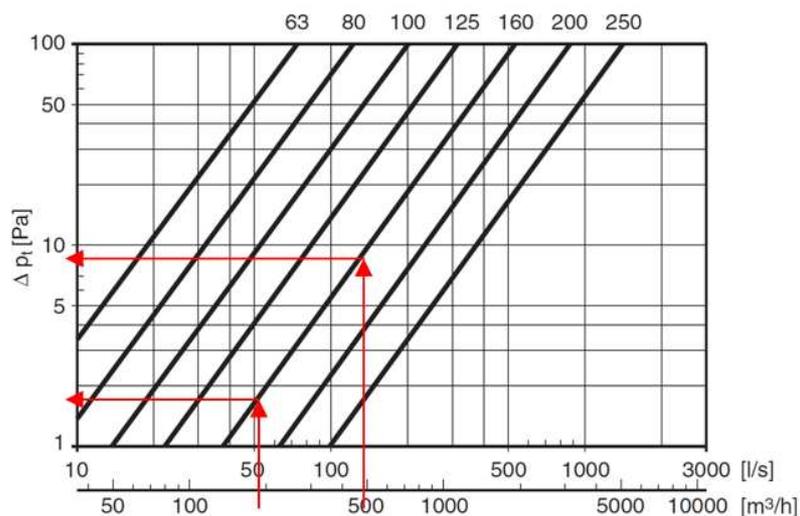
Hvor:

ζ_n = Enkeltmotstanden i det aktuelle kanalstrekk i uttakskanal

v_{nu} = Hastigheten i uttakskanalen etter t-stykket, hvor indeks n definerer det aktuelle t-stykket [m/s]

v_{nh} = Hastigheten i hovedkanalen etter t-stykket, hvor indeks n definerer det aktuelle t-stykket [m/s]

I litteraturen som ble gjennomgått var det ingen formler for hastighets- eller Reynoldsavhengige bend. Av denne grunn ble det laget egne formler for slike enkeltmotstander. Dette ble gjort ved hjelp av et trykk/mengde-diagram for et spesifikt bend fra Lindab (Lindab), se Figur 7-1.



Figur 7-1. Figuren viser trykk/mengde diagrammet som ble brukt til å beregne hastighetsavhengige enkeltmotstander til bend med forskjellige dimensjoner

Dette bendet er en type som er mye brukt i eksisterende anlegg, i tillegg til at det også tilsvarte de bendene som ble benyttet i målingene på laboratoriet. Ved å trekke linjer for forskjellige luftmengder og trykktap, fikk man flere punkter slik at det var mulig å fremstille en graf. Luftmengdene ble omregnet til hastighet ved hjelp av følgende ligning:

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

$$v = \frac{Q}{A} = \left[\frac{m}{s} \right]$$

Hvor:

Q = Luftmengde [m³/s]

A = Kanaltverrsnitt [m²]

Videre ble hastigheten, sammen med totalt trykktap og lufttetthet, benyttet til å beregne enkeltmotstandsverdien for det aktuelle bendet ved den spesifikke hastigheten.

Følgende uttrykk ble benyttet:

$$\zeta = \frac{2 * \Delta p_{tot}}{\rho * v^2}$$

Hvor:

Δp_{tot} = Totalt trykkfall ved aktuell luftmengde for et spesifikt bend

ρ = Lufttetthet [kg/m³]

v = Lufthastigheten [m/s]

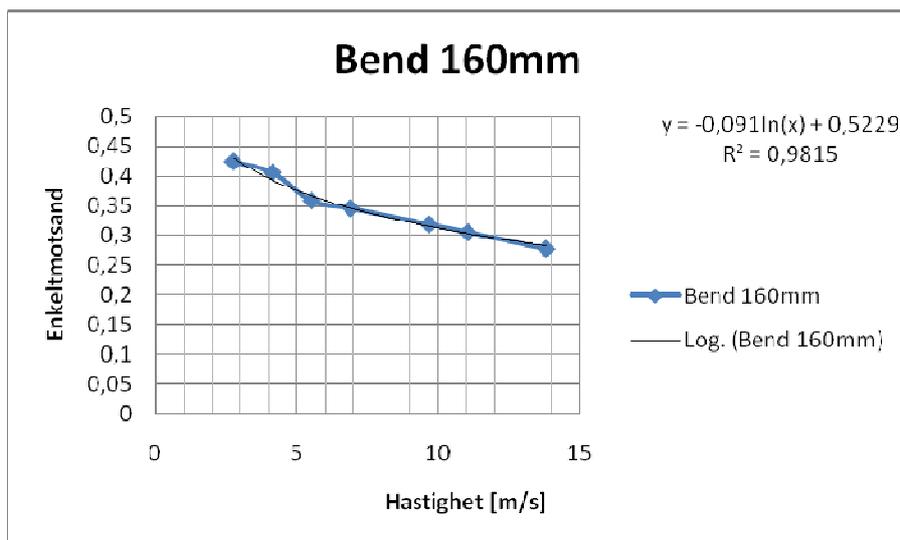
Videre ble hastighetene og enkeltmotstandsverdiene oppført i en tabell i Excel. Disse ble videre fremstilt i en graf, se Tabell 7-1 og Figur 7-2.

Tabell 7-1. Tabellen viser enkeltmotstandsregninger for et 160 mm bend.

Q [m ³ /h]	Q [m ³ /s]	Δp_{tot} [Pa]	A [m ²]	v [m/s]	ζ
200	0,05555556	1,95	0,020096	2,76450814	0,42384042
300	0,08333333	4,20	0,020096	4,14676221	0,40572758
400	0,11111111	6,6	0,020096	5,52901628	0,3586342
500	0,13888889	9,95	0,020096	6,91127035	0,34602767
700	0,19444444	18	0,020096	9,67577849	0,3193774
800	0,22222222	22,5	0,020096	11,0580326	0,30565415
1000	0,27777778	32	0,020096	13,8225407	0,2782132

Det ble laget forskjellige diagrammer for bend med ulike dimensjoner. Den blå linjen illustrerer de forskjellige referansepunktene som ble avlest fra trykk/mengde-diagrammet. Den sorte linjen er en såkalt trendlinje som viser et gjennomsnitt av de ulike målepunktene, ved hjelp av en eksponentiell ligning, $y = 0,46e^{-0,03x}$. Denne ligningen gjorde det mulig å beregne verdien til enkeltmotstanden i forhold til den aktuelle hastigheten.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 7-2. Viser en grafisk fremstilling av hvordan enkeltmotstanden til et 160 mm bend varierer i forhold til hastigheten.

Når samtlige enkeltmotstander i det aktuelle kanalstrekket var beregnet, eller avlest og summert, kunne strømningsmotstanden kalkuleres. Denne ligningen tar høyde for forskjellige motstander i kanalnettet:

$$R := \left[\left[\sum_N (\zeta_n) \right] + \lambda_n \cdot \frac{l_n}{d_n} \right] \cdot \left(\frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d_n^4} \right) + \frac{\Delta p_{\text{spjeld}}}{Q_n}$$

hvor

- ζ_n = Enkeltmotstandene i kanalstrekket, hvor indeks n definerer enkeltmotstandene i det aktuelle kanalstrekket
- λ_n = Friksjonskoeffisienten i kanalstrekket, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket
- l_n = Kanallengden til kanalstrekket, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [m]
- d_n = Kanaldimensjonen [mm], hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket
- ρ = Lufttetthet [kg/m³]
- Δp_{spjeld} = Trykkfall over eventuelle VAV-spjeld, hvor indeks n definerer det aktuelle spjeldet [Pa]
- Q_n = Luftmengden for kanalstrekke eller uttak, hvor indeks n definerer det aktuelle kanalstrekket [m³/s]

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Denne strømningsmotstanden beregnes for samtlige kanalstrekk og uttak. Ved hjelp av strømningsmotstandene, blir en strømningskoeffisient laget etter følgende ligning:

$$K_j = \frac{\sqrt{R_{j,j+1} + R_{j+1} \cdot K_{j+1}^2}}{\sqrt{R_j} + \sqrt{R_{j,j+1} + R_{j+1} \cdot K_{j+1}^2}}$$

Hvor:

K_j = Strømningskoeffisienten for uttak, hvor indeks j definerer det aktuelle uttaket

R_j = Strømningsmotstanden i uttaket, hvor indeks j indikerer hvilket uttak

$R_{j,j+1}$ = Strømningsmotstanden i hovedkanalen, hvor indeks j indikerer det aktuelle kanalstrekket

Denne koeffisienten benyttes til å beregne nye luftmengder hvor det har blitt tatt høyde for det aktuelle strømningsbildet med tanke på enkeltmotstander og friksjon i kanaler. De nye luftmengdene blir dermed:

$$Q_j := Q_0 \cdot K_j \cdot \prod_{i=1}^{j-1} (1 - K_i)$$

Luftmengden i den siste tilluftsventilen beregnes igjen ut fra kontinuitetsligningen:

$$Q_n := Q_0 - (Q_1 - Q_2 - Q_3 \dots - Q_{n-1})$$

Gjennom beregningene forklart ovenfor, kan det undersøkes hvordan luften vil fordele seg i kanalnettet i forhold til ulike strømningsmotstander. Da strømningsmotstanden i kanalnettet er ulik for de forskjellige uttakene, må dette tas høyde for ved å balansere luftfordelingen ved å justere trykkfall over spjeld. Disse spjeldene justeres, slik at ønsket luftmengde i hvert av uttakene blir korrekt. Dette fører til endringer i luftmengder i de ulike delene av kanalnettet i forhold til tidligere verdier.

Da mange av variablene i kanalnettet er direkte eller indirekte avhengig av lufthastigheter, som igjen endres ved justering av luftmengder, må beregningene løses ved hjelp av iterasjon. Det vil si at verdiene fra de nye beregningene som har blitt utført (Q_{ny}) skal sammenlignes med de tidligere verdiene (Q_{gammel}). Hvis avviket mellom absoluttverdien til $Q_{gammel} - Q_{ny} \leq 0,0001$ skal iterasjonen avsluttes. Hvis avviket mellom luftmengdene er større enn denne verdien, fortsetter iterasjonen. Det vil si at de "nye" luftmengdene skal erstatte de "gamle" luftmengdene og beregningsmodellen som er vist over skal gjennomføres helt til avviket mellom absoluttverdien til de to siste beregnede luftmengdene er mindre enn 0,0001, som er det valgte konvergeringskriteriet. Når det er avvik mellom ønsket og beregnet luftmengde, justeres trykkfallet over spjeldene til de forskjellige uttakene inntil beregnet luftmengde er tilnærmet lik ønsket luftmengde. Det blir med andre ord foretatt en innregulering av ventilasjonsanlegget.

I tillegg til iterasjon av luftmengder, er det andre variabler i kanalnettet som må beregnes på nytt på bakgrunn av nye luftmengder. Disse variablene er komponenter

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

som direkte eller indirekte er avhengig av lufthastigheten. De aktuelle variablene som må beregnes på nytt er enkeltmotstander, strømningsmotstand og -koeffisient, nødvendig trykkfall over spjeld, totaltrykk og statisk trykk i hovedkanal. Se vedlegg 2 for fullstendig oppbygning av regnearket. Under vises noen eksempler på hvordan beregningene er bygget opp i Matlab.

Hastigheten i hovedkanalen er ett eksempel. Denne parameteren er følgelig avhengig av hvilken luftmengde som er tilfellet i det aktuelle kanalstrekket, og må dermed løses på nytt:

```
Hastighet i hovedkanal
for i=1:ant_rom
    Qsum=0;
    for j=i:ant_rom
        Qsum = Qsum + Q(1,j);
    end
    v_h(1,i) = Qsum/((pi*d_h(1,i)^2)/4);
end
```

Et annet eksempel er hvordan beregninger rundt nødvendig trykkfall over spjeld ble utført. Selve trykkfallet over spjeldet behøves ikke å løses ved iterasjon. Som utklippet fra Matlab under viser, undersøkes en såkalt relativ differanse [1] mellom ønsket luftmengde til de ulike rommene ($o_{\text{luftmengde}}$) med den faktiske luftmengden (Q_{ny}). Videre justeres nødvendig trykkfall over spjeld (dps) [2]. Dette gjøres ved at dps justeres proporsjonalt i forhold til relativ differanse mellom luftmengdene. En proporsjonalkonstant bestemmer hvor stor justering av dps som skal utføres per iterasjon. Hvordan denne beregningen gjennomføres følger:

$$O_{\text{luftmengde}}_{\text{uttak}_x} = 0,0278 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{ny}_x = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{diff_luftm} = \frac{0,0278 - 0,04}{0,0278} = -0,439 \text{ m}^3/\text{s}$$

Som regnestykket viser, har det aktuelle uttaket for mye luft. Det vil si at spjeldet til uttaket må strupe spjeldet, altså øke trykket over spjeldet. Dette gjøres på følgende måte:

$$\text{Faktor} = 1,0$$

$$dps = 25 \text{ Pa}$$

Det nye trykkfallet til spjeld x , blir dermed:

$$dps = 25 - 1,0 * (-0,439) = 25,439 \text{ Pa}$$

Dette viser at det aktuelle spjeldet struper og trykkfallet over spjeldet øker. Det vil dermed gå noe mindre luft enn hva som var utgangspunktet. Denne beregningen utføres til ønsket luftmengde er lik den aktuelle luftmengden til uttak x .

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

```
% Sjekker differanse mellom faktisk luftmengde og ønsket luftmengde
diff_luftm = (o_luftmengde - Qny)./o_luftmengde;          [1]

% Justerer trykkfall over VAV-spjeld(dps)
faktor = 0.01;
dps = dps - faktor*diff_luftm;                          [2]

% Test for negative trykkfall
for i=1:ant_rom                                         [3]
    if(dps(1,i)<0)
        dps(1,i)=1E-3;
        display('*****ADVARSEL: Ikke fysisk mulig!')
        kontroll = 0;
    end
end
```

Spjeld kan ikke ha et negativt trykkfall over seg, av denne grunn ble det laget en løkke for å kontrollere at spjeldene til de forskjellige uttakene ikke regulerer med negative trykk, dette vises i [3]. Hvis beregningene viser at trykket over spjeldet er mindre enn 0 ($dps < 0$) får man opp en feilmelding på at dette ikke er fysisk mulig og beregningene avsluttes.

7.2.3 Beregninger av statisk trykk og plassering av trykksensor

I det påfølgende vil det blir forklart hvordan beregninger ble gjennomført, for å simulere forskjellige plasseringer av statisk trykksensor og regulere hovedluftmengden for å opprettholde et konstant statisk trykk i valgt plassering.

1. Når første gjennomregning av luftmengder i uttak og de nødvendige trykkfallene over spjeldene har blitt gjennomført, låses trykkfallene over spjeldene. Disse trykkfallene er fastsatte verdier som ikke skal endres foruten at det aktuelle uttaket skal stenges.
2. Det gjennomføres en statisk trykkberegning i hvert kanalstrekk. Metoden for dette beskrives under.
3. Det velges et punkt i hovedkanalen hvor det ønskes å opprettholde konstant statisk trykk. Det er dette referansetrykket som viften til ventilasjonsaggregatet skal holde konstant. Det er med andre ord plasseringen av trykksensoren som ønskes undersøkt. Verdien til referansetrykket som skal holdes konstant, hentes fra den statiske trykkberegningen som blir utført når anlegget er innregulert.
4. Videre stenges utvalgte uttak. Dette vil føre til en endring i luftmengde og dermed må det utføres nye luftmengdeberegninger for kanalnettet. Dette utføres som forklart i delkapittelet over.
5. Trykkfall i hoved- og uttakskanaler blir beregnet i forhold til nye luftmengder.
6. Det statiske trykket beregnes i hvert kanalstrekk i hovedkanalen etter Bernoullis ligning.
7. Når det statiske trykket er beregnet, sammenlignes dette med referansetrykket som er valgt å holde konstant. Hvis det er avvik mellom ønsket og faktiske verdi, skal viftepådraget endres slik at det statiske trykket er tilnærmet lik ønsket verdi. Dette gjøres på følgende måte:

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Differanse statisk trykk, $\text{diff}_{\text{stat}} = p_{\text{statisk virkelig}} - p_{\text{statisk konstant}}$

Hvis:

$p_{\text{statisk virkelig}} < p_{\text{statisk konstant}}$: økes luftmengden

$p_{\text{statisk virkelig}} > p_{\text{statisk konstant}}$: reduseres luftmengden

8. Når det gjelder differansen mellom de statiske trykkene er denne satt til å være mindre enn 2,5 Pa. Grunnen til denne verdien er at det ble gjennomført et antall beregninger for å undersøke resultatene med varierende differanse. En differanse på 2,5 Pa er et resultat av en optimalisering i forhold til antall beregninger som konvergente og et ønske om lavest mulig avvik.

For å kontrollere at luftmengdejusteringen ikke fulgte en gal trend og dermed økte differansen mellom det statiske trykket som ble holdt konstante og det beregnede, ble det lagt en faktor. Denne faktoren sørget for at beregningen skiftet fortegn slik at den gale trenden ble snudd. Dette ble gjort ved å undersøke differansen i statisk trykk i det aktuelle punktet som forklart over. Hvis $\text{diff}_{\text{stat}}$ fra siste beregning var større enn $\text{diff}_{\text{stat}}$ fra nest siste beregning skiftet faktoren fortegn. Med dette endret luftmengdejusteringen i motsatt retning. Hvis den siste beregnede $\text{diff}_{\text{stat}}$ mindre enn forrige $\text{diff}_{\text{stat}}$, fortsatte luftmengdejusteringen i samme retning.

I forhold til differansen i statisk trykk endres hovedluftmengdene på følgende måte:

9. $Q_0 = Q_0 + \text{forteng} * 0,05 * Q_0 * \text{diff}_{\text{stat}}$
10. I noen av beregningene ble det benyttet en endring på 5 % av Q_0 , i andre beregninger ble denne endret til en betydelig mindre faktor på 0,0001 % av Q_0 .
11. Hovedluftmengden har nå endret sin verdi, dermed må nye luftmengder i hoved- og uttakskanalene beregnes på nytt.
12. Når disse endringene er gjennomført er det nødvendig å beregne det statiske trykket på nytt.
13. Videre undersøkes differansen, $\text{Diff}_{\text{stat}} = p_{\text{statisk virkelig}} - p_{\text{statisk konstant}}$
14. Hvis differansen i statisk trykk er mindre en valgt nøyaktighet avsluttes beregningene, hvis ikke justeres luftmengdene på nytt (fra og med punkt 7).

I denne beregningsmodellen har vært vesentlig å utføre gode statiske trykkberegninger og regulere luftmengden etter statisk trykk på en god måte. Når det gjaldt de statiske trykkberegningene, ble disse utført ved hjelp av en versjon av Bernoullis ligninger, kalt energibevaringsligningen:

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

$$p_{\text{tot},1} = p_{\text{tot},2} + h_l$$

Hvor:

$p_{\text{tot},1}$ = Totaltrykk i situasjon 1 [Pa].

$p_{\text{tot},2}$ = Totaltrykk i situasjon 2 [Pa].

Δp_h = Trykktap på grunn av enkeltmotstander og friksjon i kanalnettet [Pa].

Totaltrykk er som kjent summen av dynamisk- og statisk trykk:

$$p_{\text{stat},1} + p_{\text{dyn},1} = p_{\text{stat},2} + p_{\text{dyn},2} + \Delta p_h$$

Hvor:

p_{stat} = Statisk trykk i det aktuelle punktet i kanalen [Pa].

p_{dyn} = Dynamisk trykk i det aktuelle punktet i kanalen [Pa].

Δp_h = Trykktap på grunn av enkeltmotstander og friksjon i kanalnettet [Pa].

Dynamisk trykk er trykket som oppstår på grunn av oppbremsing av luften og beregnes på følgende måte:

$$p_{\text{dyn}} = \frac{\rho v^2}{2} \text{ [Pa]}$$

Hvor:

ρ = Lufttettheten [kg/m³]

v = Lufthastigheten [m/s]

Når det statiske trykket i kanalnettet skulle beregnes, ble det gjort på bakgrunn av følgende antagelser:

1. Konstant atmosfærisk trykk i rommet hvor luften ble tilført. Rommet er med andre ord ikke trykksatt og har likt atmosfærisk trykk inne og ute.
2. Lik temperatur i kanalnettet og i rommet, dette fører til lik lufttetthet. Denne ble satt til 1,19 kg/m³, som er tettheten for luft ved 20 °C.

For beregningene av trykkendringer ble systemgrensen satt ved overgangen fra kanalnettet til omgivelsene. Da det er trykkforholdene i kanalnettet som er interessant, ble det atmosfæriske trykket satt som nullnivå.

For å beregne det statiske trykket etter viften, ble det tatt utgangspunkt i dynamisk trykk etter viften og i uttaket, samt trykkfall i denne delen av kanalstrekket. Hastighetene i de forskjellige kanalstrekkele var tidligere beregnet, dermed kunne det dynamiske trykket enkelt beregnes. I og med at atmosfærisk trykk ble satt som nullpunkt ved utløp, blir det statiske trykket i dette punktet likt atmosfærisk og dermed null. Dermed kunne det statiske trykket beregnes på følgende måte:

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

$$p_{\text{stat},1} + p_{\text{dyn},1} = 0 + p_{\text{dyn},2} + \Delta p_h \rightarrow p_{\text{stat},1} = (p_{\text{dyn},2} - p_{\text{dyn},1}) + \Delta p_h$$

Når det statiske trykket i den første delen av kanalnettet var kjent, ble de statiske trykkendringene videre utover i kanalnettet beregnet på følgende måte:

$$p_{\text{stat},n} = p_{\text{stat},n-1} + p_{\text{dyn},n-1} - p_{\text{dyn},n} - \Delta p_h$$

Hvor:

$p_{\text{stat},n}$ = Statisk trykk i det aktuelle punktet i kanalen [Pa]

$p_{\text{stat},n-1}$ = Statisk trykk i det foregående punktet i kanalen [Pa]

$p_{\text{dyn},n-1}$ = Dynamisk trykk i det foregående punktet i kanalen [Pa]

$p_{\text{dyn},n}$ = Dynamisk trykk i det aktuelle punktet i kanalen [Pa]

Δp_h = Trykktap på grunn av enkeltmotstander og friksjon mellom de to aktuelle punktene [Pa]

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

7.3 Målinger

For å undersøke variasjoner av trykkforhold, luftmengdefordeling, frekvens og effektbehov til vifte i praksis, ble det utført fysiske målinger på et enkelt kanalnett. Kanalnettet ble montert og satt opp av denne rapportens forfattere i klimalaboratoriet i Aalborg Universitet. Figur 7-3 viser et bilde av deler av kanalnettet og dets komponenter.



Figur 7-3. Bildet viser det egenmonterte kanalnettet med tilhørende utstyr, oppsatt i klimalaboratoriet på Aalborg Universitet.

7.3.1 Oppbygging av kanalnettet

Grunnet begrenset tilgang på trykktransducere, samt plassbegrensning, ble det valgt å utforme et relativt enkelt kanalnett. Kanalnettet ble utført med fire uttak, som alle besto av samme dimensjon og prosjektert med samme luftmengde, på bakgrunn av et antatt kontor på 14 m² med to brukere tilstedet, se Tabell 7-2 for utregning av luftmengde.

Tabell 7-2. Tabellen viser en oversikt over prosjekterte luftmengder for de fire uttakene i kanalnettet. Verdiene er beregnet iht. krav i teknisk forskrift.

	Antall [pers]	Luftmengde per pers. [l/s*pers]	Romareal [m ²]	Luftmengde per m ² [l/s*m ²]	Beregnet luftmengde [l/s]	Beregnet luftmengde [m ³ /h]
Uttak 1	2	7	14	1	28	100,8
Uttak 2	2	7	14	1	28	100,8
Uttak 3	2	7	14	1	28	100,8
Uttak 4	2	7	14	1	28	100,8
Totalt						403,2

Det ble montert to spjeld for hvert uttak, hvorav ett fungerte som et rent innregulerings-spjeld for å balansere luftmengdene i kanalnettet. Det andre simulerte et

7.3.2 Innregulering av anlegget

Når anlegget var ferdig montert måtte det innreguleres. Dette ble gjort ved bruk av proporsjonalmetoden. Denne metoden går ut på at man måler de aktuelle luftmengdene på hvert uttak når alle spjeld er åpne og hovedluftmengden er høyere enn prosjektert. Videre sammenlignes de aktuelle luftmengdene med hvilke luftmengder man ønsker å ha i de forskjellige uttakene. Disse to verdiene benyttes til å beregne et forholdstall, som sier hvilken prosentandel av luftmengde det er i det aktuelle uttaket i forhold til hvilken luftmengde som ønskes, se formel nedenfor:

$$F = \text{Målt luftmengde} / \text{Prosjektert luftmengde}$$

Når dette forholdet er beregnet har man oversikt på hvordan luftfordelingen er før man justerer spjeldene i anlegget. Den ventilen med lavest forholdstall er indeksventilen og den ventilen som er lengst unna viften er referanseventilen. Disse forholdene ble kartlagt under utbalanseringen av anlegget, Tabell 7-3 viser de forskjellige luftmengdene og forholdstallene før og etter innregulering.

Tabell 7-3. Tabellen viser verdiene for luftmengder og forholdstall før og etter innregulering av kanalnettet.

Innregulering av kanalnett					
	Hastighet [m/s]	Målt luftmengde [m ³ /h]	Prosjektert luftmengde [m ³ /h]	Forholdstall	
Uttak 1	2,74	153	101	1,51	<i>Indeks</i>
Uttak 2	3,03	170	101	1,68	
Uttak 3	3,56	199	101	1,97	
Uttak 4	3,61	202	101	2,00	<i>Referanse</i>
Innregulert					
Uttak 1	1,97	110	101	1,09	
Uttak 2	1,98	111	101	1,10	
Uttak 3	1,95	109	101	1,08	
Uttak 4	1,97	110	101	1,09	
SUM		440	404		

Som tabellen viser hadde uttak 1 det laveste forholdstallet. Fremgangsmåten videre var å justere på spjeldet på uttak 4 slik at forholdstallet til referanseventilen og indeksventilen var tilnærmet like. Videre justeres spjeldene til de resterende uttakene slik at forholdstallene er tilnærmet like forholdstallet til referanseventilen. Forholdstallene ble justert ved å undersøke luftmengdene i hvert uttak slik at de var tilnærmet like. Når dette var utført ble viften regulert ned til ønsket totalluftmengde. Som Tabell 7-3 viser, er luftmengdene i de forskjellige uttakene tilnærmet like og har et lite avvik i forhold til prosjekterte luftmengder. Anlegget er med andre ord innregulert på en tilfredsstillende måte.

7.3.3 Målinger

Som beskrevet tidligere ønsket gruppen å undersøke forskjellige forhold som var av interesse for oppgaven. Disse var trykkvariasjoner og trykkfall i kanalnettet, luftmengdefordeling, frekvens og vifteeffekt. De aktuelle målingene ble gjort for samtlige scenarioer. Med ulike scenarioer menes de ulike kombinasjonene av plassering av trykksensor og variasjon av luftmengder til de ulike grenkanalene. En oversikt over de ulike scenarioene vises i Tabell 8-4.

7.3.3.1 Logging av statisk trykk

Gjennom samtlige scenarioer ble det logget statisk trykk ved hjelp av trykktransducere som var koblet til en datalogger som samlet og lagret all data ved hjelp av tilhørende software. På denne måten hadde gruppen mye måledata for å kartlegge statiske trykksvingninger ved endringer i kanalnettet. Disse måledataene ble importert til Matlab, for videre undersøkelser.

7.3.3.1.1 Trykktransducere

Trykktransducere er en komponent som måler differanser i trykk med minimal måleusikkerhet. Aalborg universitet hadde seks forskjellige trykktransducere, to med måleområdet 0-500 Pa, to med måleområdet 0-100 Pa og to med måleområdet 0-20 Pa. Disse trykktransduserne ble ved hjelp av kabler koblet til kanalnettet på strategiske steder, Figur 7-6 viser prinsippet bak monteringen.

7.3.3.1.2 Nipler for statisk trykk

For å avlese og logge det statiske trykket i kanalnettet, ble det boret hull på strategiske valgte steder i kanalnettet, for så å feste små kobberør (nipler) i kanten av spirokanalen. Det ble montert seks målenipler på kanalnettet, disse ble koblet til hver sin trykktransducer. På den måten var det mulig å logge og undersøke statiske trykkvariasjoner. Med denne type utforming ble de statiske trykkmålingene ikke påvirket av dynamiske trykkvariasjoner og fluktuasjoner. Innretningen vises til høyre i Figur 7-5.

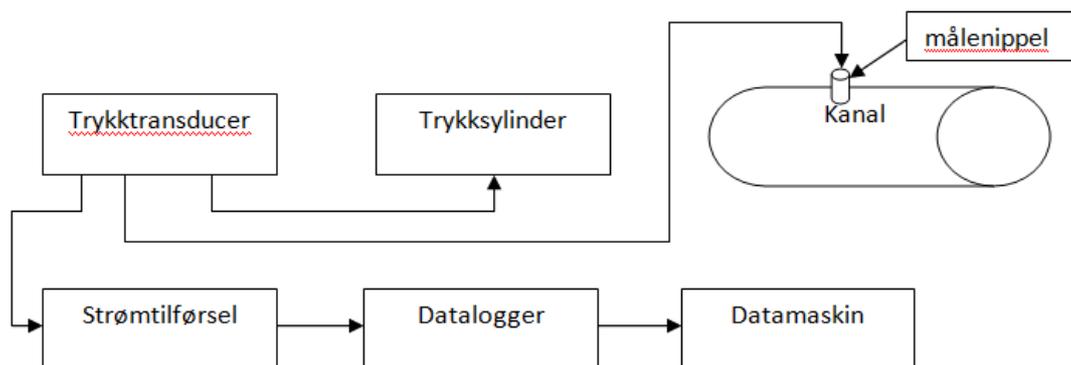
7.3.3.1.3 Referansetrykk

Selv om alle målingene og loggingen ble utført i et laboratorium under kontrollerte klimatiske tilstander ble det, for å minimere måleusikkerhetene, koblet en trykksylinder til den ene inngangen på trykktransduserne, se Figur 7-5. Trykksylinderen er en tett sylinder med et lite hull i bunn, og på den måten sikres et stabilt trykk inne i sylinderen som ikke påvirkes av ytre krefter som for eksempel vind.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 7-5. Bildet viser hvordan trykktransduserne er tilkoblet en trykksylinder som holder konstant trykk. Et digitalt barometer ble så benyttet for å avlese det atmosfæriske trykket som igjen representerer trykket i trykksylinderen.

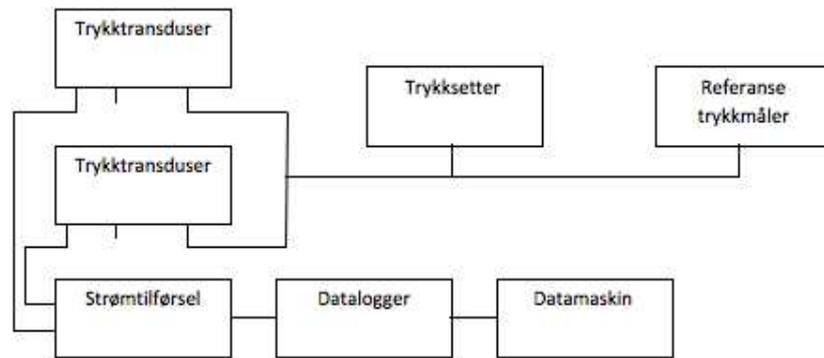


Figur 7-6. Bildet viser en skisse over hvordan det statiske trykket i kanalen ble logget ved hjelp av en trykktransducer og tilhørende komponenter, og viser prinsippet for oppkoblingen mellom disse. Tegningen er produsert i Microsoft Word.

7.3.3.1.4 Kalibrering

For å sikre gode og korrekte trykkmålinger, ble alle trykktransducere kalibrert. Dette ble utført ved at trykktransduserne ble tilkoblet et referanseinstrument og en spenningskilde som igjen ble tilkoblet en datalogger, se Figur 7-7.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



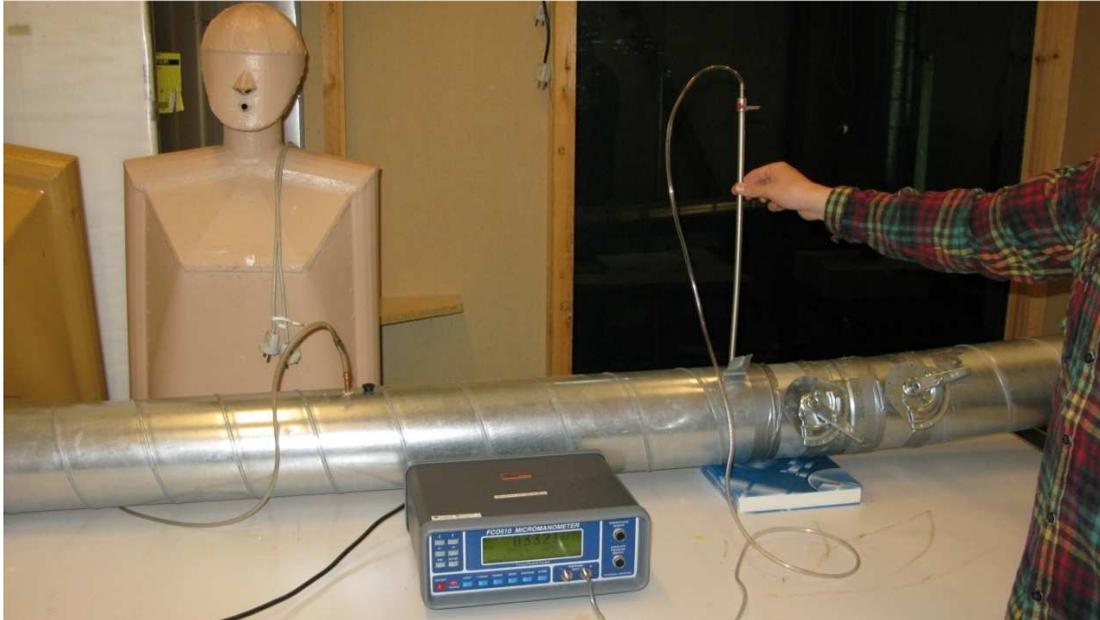
Figur 7-7. Bildet viser en skisse over kalibreringsprinsippet og dets komponenter. Tegningen er produsert i Microsoft Word.

Konseptet er at det lages en trykkurve i forhold til målte spennings signaler ved ulike trykk som settes ved hjelp av en pumpe. Disse variablene plottes inn i Excel, lager en regresjonskurve for dermed å få en formel for sammenhengen mellom trykk og spenningsignal. Vedlegg 21 viser oversikt over kalibreringskurvene for alle trykktransducerne.

7.3.3.1.5 Pitotrør

I tillegg til å logge statisk trykk ved hjelp av trykktransducere, ble det også utført manuelle målinger av statisk trykk ved hjelp av et pitotrør og et mikromanometer. Dette ble gjort både for å kontrollere de loggede verdiene og for simulere forskjellige plasseringer av statisk trykksensor og justere luftmengdepådraget etter et gitt konstant statisk trykk i forskjellige testscenarier. Pitotrøret ble også benyttet for å måle totaltrykket i strategiske punkter langs hovedkanalen, samt før og etter spjeld og enkeltmotstander, i forbindelse med valideringen av regnearket. For å få stabile og gode avlesninger med pitotrøret, ble det montert gummipakninger i borrehullene som passet med dimensjonen på pitotrøret, slik at det ikke oppsto luftlekkasje fra kanalnettet ut gjennom disse hullene. Når hullene ikke ble brukt til målinger, ble det teipet igjen for å unngå luftlekkasje. Det ble også lagt vekt på at alle målingene ble utført i senter av kanaltverrsnittet, med et pitotrør som både var rettet rett mot luftstrømmen og som også sto i en vertikal posisjon. Dette ble gjort for å sikre at sammenlignende verdier fra ulike målepunkter ikke ble påvirket av ulik posisjonering av pitotrøret. Figur 7-8 viser et bilde av hvordan pitotrøret ble posisjonert under trykkmålinger i kanalnettet.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 7-8. Bildet viser hvordan pitotrør og mikromanometer ble benyttet for å måle statisk trykk og totaltrykk på strategiske steder i kanalnettet.

7.3.3.1.6 Registrering av hovedluftmengde

For å ha kontroll på hovedluftmengden som viften leverte til kanalnettet, ble det montert en måleblende¹⁴ før viften. Måleblendens ble montert med nødvendige avstander og rette kanalstrekk både før og etter innretningen, slik det er anbefalt i henhold til DS/EN ISO 5167-2 (Dansk Standard, 2003). Lengden fra nærmeste bend til innsnevringen bør være på minst ti ganger kanaldimensjon, mens avstanden etter innsnevringen bør være på minst fem ganger kanaldimensjon. Se Figur 7-9 for bilde av montasjen. Måleblendens ble tilkoblet en differansetrykkmåler, som kontinuerlig viste trykkfall over måleblendens.

¹⁴ En måleblende er et måleelement for måling av luftgjennomstrømming ved hjelp av Bernoullis ligning. Måleblendens består av en plate med hull i, hvor luften strømmer gjennom. I denne prosessen oppstår et trykkfall som er avhengig av hvor mye luft som strømmer gjennom.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 7-9. Bildet viser måleblenden som ble installert for å overvåke hovedluftmengden i kanalnettet.

Ved hjelp av en formel og et tilhørende diagram for trykk og luftmengde, kunne dermed hovedluftmengden overvåkes til enhver tid. Denne metoden skal være den mest korrekte målingen med tanke på å måle luftmengder. Målenøyaktigheten ved bruk av måleblende er på ± 1 prosent, så lenge Reynoldstallet¹⁵ er større enn 5000 (Hansen, H.E. et al., 1997). Mer om måleusikkerheter i kapittel 8.9. Ut fra beregninger i det egenutviklede regnearket ligger Reynoldstallet i dette kanalnettet godt over 5000.

7.3.3.1.7 Registrering av luftmengder i grenkanaler/uttak

For å avlese luftmengdene i uttakskanalene ble det benyttet en måletrakt i kombinasjon med et anemometer som målte lufthastighet, se Figur 7-11 for bilde. Ved hjelp av en tabell som var påført måletrakten, kunne lufthastighetene dermed overføres til luftmengdeverdier. For å redusere måleusikkerheten for denne målemetoden, ble det påmontert en perforert fordelingsplate ved uttaket, slik at luften ble godt fordelt før den passerte trakten. Og for å sikre at måletrakten ble plassert likt for hver måling, ble det tegnet på en markering for hvor denne skulle plasseres, se Figur 7-10.

¹⁵ Reynoldstallet er et tall som beskriver strømmingen av for eksempel luft. Ved en viss verdi for Reynoldstallet, går luften fra laminær til turbulent strømming.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 7-10. Bildet viser ventilutformingen ved utløpet i hvert uttak, i tillegg til markering for plassering av måletrakt.

Måling av luftmengde ved hjelp av måletrakt er ikke like nøyaktig som ved bruk av måleblende, men ovennevnte tiltak var med på å redusere usikkerheten. Flere målinger ved bruk av måletrakt viste at resultatene ble ulike for ulike plasseringer av trakt mot ventil. Store utslag ble også registrert når fordelingsplaten ble fjernet.



Figur 7-11. Bildet viser måletrakt i kombinasjon med et anemometer, som ble benyttet for å måle luftmengder i uttakene.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

7.3.3.1.8 Effektanalysator

I tillegg til å registrere trykkvariasjoner og luftmengdefordeling, var det også av interesse å se på vifteeffekten ved de ulike scenarioene, i forhold til energibehov og SFP-verdi for anlegget. Effekten ble avlest ved hjelp av en effektanalysator som ble koblet inn på strømtilførselen før frekvensomformereren, slik at alle tapsledd ble tatt høyde for.

7.3.3.1.9 Utstysliste

Nedenfor vises en komplett liste over det utstyret som ble benyttet i forbindelse med målingene i Aalborg.

Vifte: Ingen produsent. Foroverbøyde skovelhjul

Frekvensomformer: Danfoss VLT2800

Effektmåler: Norma D5255S - A/C Power analyser

Software: Term90 version 2.3

Datalogger: Fluke Helios Plus 2287A

Fluke Thermocouple/DCV Connector (175)

Trykktransduser: Furness Controls Limited, FCO 44

Referansetrykk: Furness FC0510 Micromanometer

Barometer: Mensor Digital Pressure Gauge Modell 2104 SN 530990

Trykksylinder: Laget ved Aalborg Universitet

Differansetrykkmåler: Furness Controls Limited – Digital Manometer FC016

Hastighetsmåler: DANTEC 54N60 Flowmaster –precision anemometer

Lufttrakt: Alnor AM-600 – GGA 45

Måleblende: Fläkt EHBA-016-1

Annet utstyr: Diverse slange, spirokanaler, t-stykker og bend fra Lindab

Spjeld: Bladspjeld/innreguleringspjeld fra Lindab

Tilluftsventil: Ingen produsent. Perforert fordelingsplate fra Lindab

7.4 Intervjusamtaler av fokusgrupper

For å presentere krav til behovstilpassede ventilasjonsanlegg i praksis, samt hvilke krav og momenter som må stilles til dette, ble disse utformet i samarbeid med en arbeidsgruppe som ble opprettet i forbindelse med et SINTEF-prosjekt kalt reDuCeVentilation.

Arbeidsgruppen ble satt sammen av et tilfeldig utvalg av representanter fra ventilasjons- og byggebransjen etter invitasjon, med representanter fra flere av de ulike instansene som inngår i en byggeprosess. Det vil si entreprenører, leverandører, rådgivere, byggeiere, forskere og bransjeorganisasjoner. Firmaene og organisasjonene som har vært en del av arbeidsgruppen, i tillegg til denne rapportens forfattere, besto av OptoSense, Erichsen & Horgen A/S, Stiftelsen Vekst, SINTEF Byggforsk, Swegon A/S, TROX Auranor, Standard Norge, Undervisningsbygg Oslo og Foreningen for Ventilasjon, Kulde og Energi (VKE).

Innledningsvis i denne prosessen ble det holdt et miniseminar med en liten presentasjon og videre en diskusjon på hva de forskjellige deltakerne mente var viktige momenter og krav som burde stilles, for å forbedre behovstilpassede ventilasjonsanlegg. Videre ble det kalt inn til arbeidsmøter, hvor dette arbeidet ble diskutert videre. Rapportens forfattere hadde som oppgave å være møteledere og referenter (se vedlegg 22 for møterefater), samt kalle inn til møter og utvikle kravspesifikasjonen underveis i prosessen. Når det ble avgjort at de ønskede momentene og krav var godt definert og vel beskrevet ble det kalt inn til et endelig konsensumøte hvor arbeidsgruppen sammen diskuterte den ferdigstilte kravspesifikasjonen og godkjente kravene og momentene som inngikk i denne. De endelige resultatene av denne prosessen skal publiseres på SINTEFs sin hjemmeside og i tillegg i VVS-magasinet gjennom en reportasje.

8 Resultater

8.1 Optimalisering gjennom bruk av matematiske beregningsverktøy

Beregningsverktøyet som ble utviklet i forbindelse med denne oppgaven hadde muligheter til å utføre flere ulike typer beregninger som var interessante for oppgavens fokusområder. Disse gikk ut på å undersøke plasseringsstrategier av trykksensor og de konsekvenser dette hadde for luftmengdefordeling, samt undersøkelser rundt nødvendig trykkfall over spjeld, i forhold til optimal luftmengdefordeling. Målet var å finne svar på den mest gunstige plasseringen av trykksensor i forhold til å oppnå optimal luftmengdefordeling.

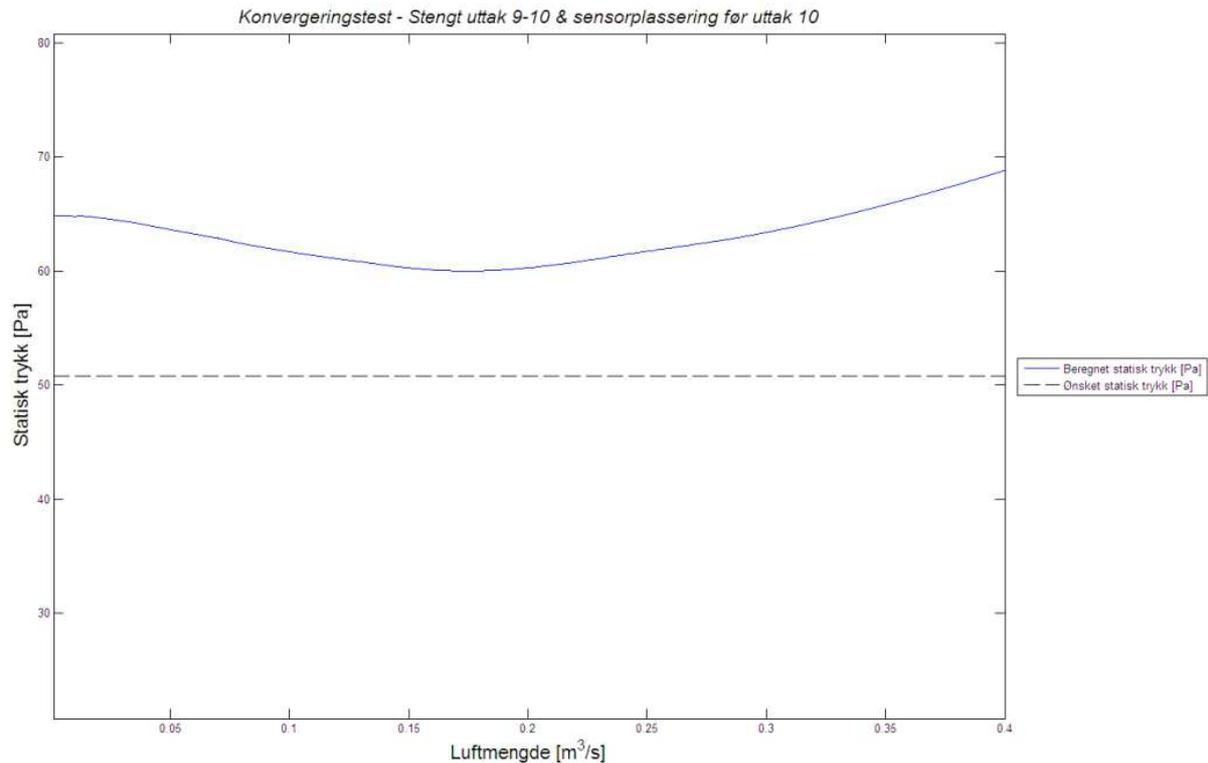
8.2 Validering luftmengdefordeling

Beregningene for luftmengdefordeling og statisk trykk er basert på algoritmer som bygger på iterering og nye beregninger, hvor det er definert krav til konvergenskriterier og antall iterasjoner for å oppnå gode og korrekte resultater. Verdiene for statisk trykk og luftmengdefordeling er dermed avhengig av om beregningene konvergerer eller ikke. I tilfeller hvor beregningene ikke konvergerer, vil det i prinsippet si at det ikke finnes noen matematisk løsning på det aktuelle tilfellet. Beregningene vil presentere et resultat som er mer eller mindre tilfeldig i forhold til hva verdiene er i det tidspunktet antall maksimale iterasjoner har nådd sin grense. Verdiene kan til og med virke og være fornuftige, selv om dette kan skyldes tilfeldigheter. Det er derfor veldig viktig å kontrollere beregningene i forhold til om disse har konverget. I regneverktøyet er det lagt inn en kode som varsler om at beregninger ikke konvergerer, slik at dette ble registrert og overvåket. Ved beregning av flere ulike scenarioer var det flere beregninger som gikk fint, men også flere som ikke konvergete og dermed avga noe merkelige resultater. Samtidig var det beregninger som ikke konvergete, men allikevel ga fornuftige verdier.

For å validere og forklare resultatene fra beregningene ovenfor, presenteres det videre grafiske fremstillinger for en såkalt konvergeringstest som ble opprettet for dette formålet. Det presenteres ikke konvergeringstester for samtlige resultater, men kun for noen utvalgte som representerer tendensen og som gjelder for flere scenarioer.

Konvergeringstestene ble utført ved at det ble laget et plot på bakgrunn av hvilket statiske trykk som ble tilfellet i det valgte kanalnett med hovedluftmengder fra 0 til 0,4 m³/s. I plottet ble det lagt inn en linje som indikerte hva det statiske trykket i den aktuelle sensorplasseringen skulle være (referansetrykket). Plottet vil forenkle analysen av resultatene ved å se hvilke hovedluftmengder som eventuelt ga et statisk trykk innenfor kravet til avviket på 2,5 Pa, og om beregningen i det hele tatt konvergete. Figur 8-1 viser et plot fra konvergeringstesten for et scenario med dimensjonert hovedkanal hvor uttak 9 og 10 ble stengt, samtidig som sensoren var plassert før uttak 10.

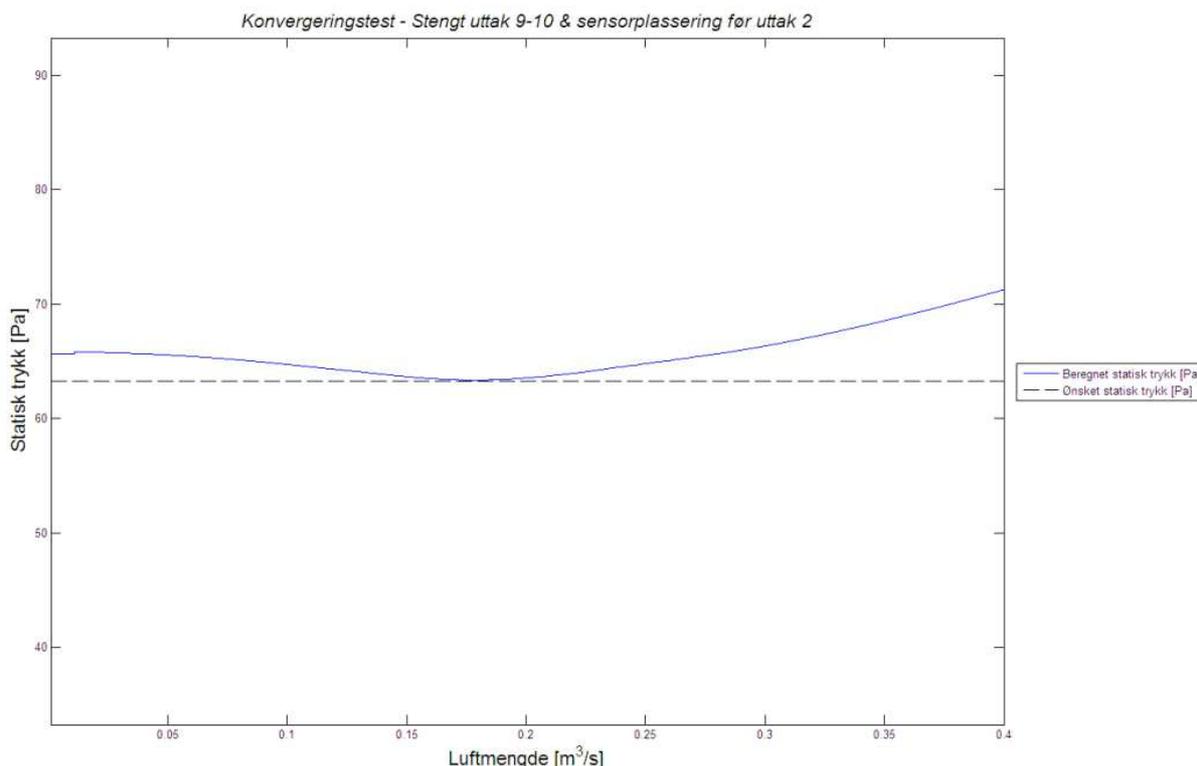
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-1. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 9 og 10 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 10 i en dimensjonert hovedkanal. Diagrammet er produsert i Matlab.

Figuren viser at det beregnede statiske trykket aldri får et avvik mindre enn ca. 9 Pa i forhold til ønsket verdi. Dette viser med andre ord at beregningen ikke konvergerer og at det ikke finnes en matematisk løsning for dette scenarioet. Hovedluftmengden, som resultatene for luftmengdefordeling baserer seg på, er dermed med stor sannsynlighet feil, noe som igjen fører til feil luftmengdefordeling. For det samme scenarioet, men med en sensorplassering før uttak 2, vises resultatet av konvergeringstesten i Figur 8-2.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

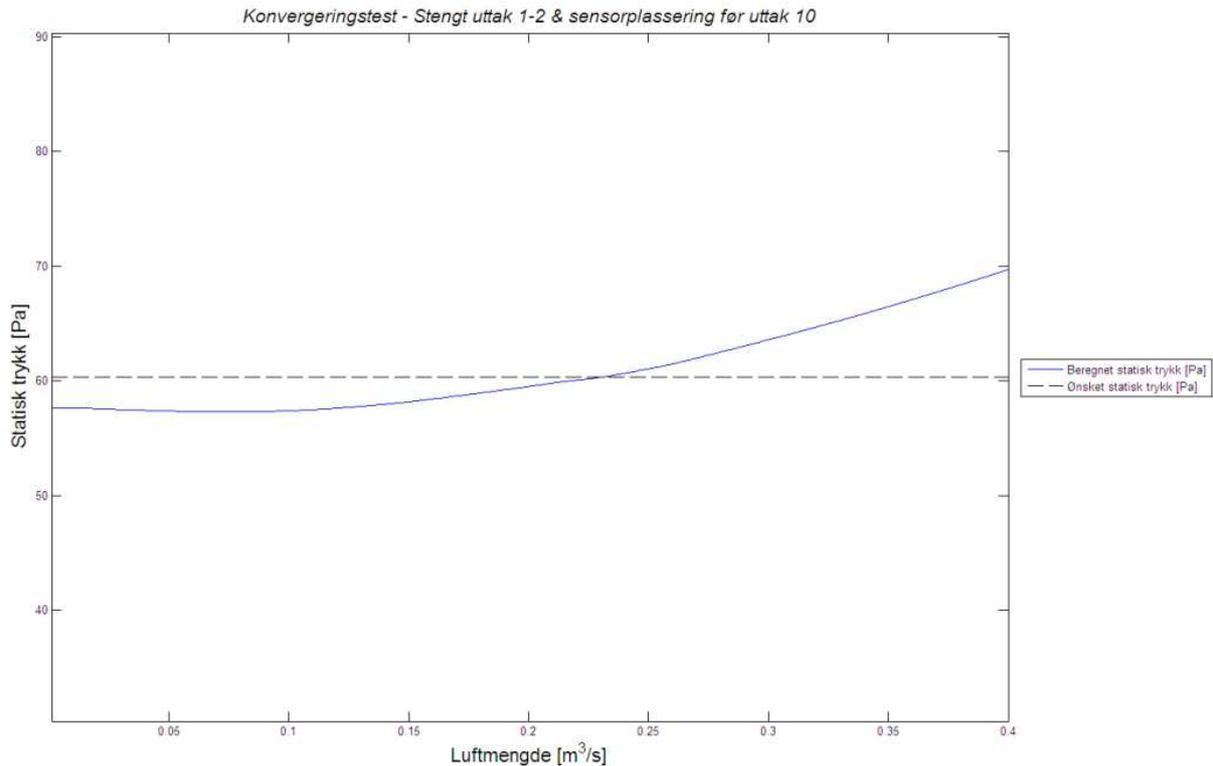


Figur 8-2. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 9 og 10 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 2 i en dimensjonert hovedkanal. Diagrammet er produsert i Matlab.

Konvergeringstesten i Figur 8-2 viser beregnede verdier som i et gitt område for hovedluftmengde gir omtrent tilsvarende verdier som ønsket statisk trykk. Beregningen konvergerer med andre ord, og resultatene for luftmengdefordeling er derfor pålitelige. Grafen illustrerer også konsekvensen av å variere på kravet til nøyaktighet når det gjelder avviket mellom beregnet og ønsket statisk trykk. Jo større tillatt avvik, jo flere løsninger for hovedluftmengde, og dermed flere løsninger for luftmengdefordeling. I tilfeller hvor kravet til avvik ikke skulle overskride 0 Pa, ville det ikke vært noen matematisk løsning for dette scenarioet.

Resultatene for de to nevnte scenarioene sammenlignes i sammenstilling 12, se Figur 8-22. I utgangspunktet ser det ut til at luftmengdefordelingen blir bedre når det statiske trykket reguleres etter sensorplassering før uttak 2 enn for uttak 10. Med tanke på konvergeringstestene som nå er presentert, er det opplagt at denne slutningen nødvendigvis ikke er korrekt. I lignende tilfeller som dette kan det bli utfordrende, og i verste fall feil, å konkludere de to scenarioene seg i mellom.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

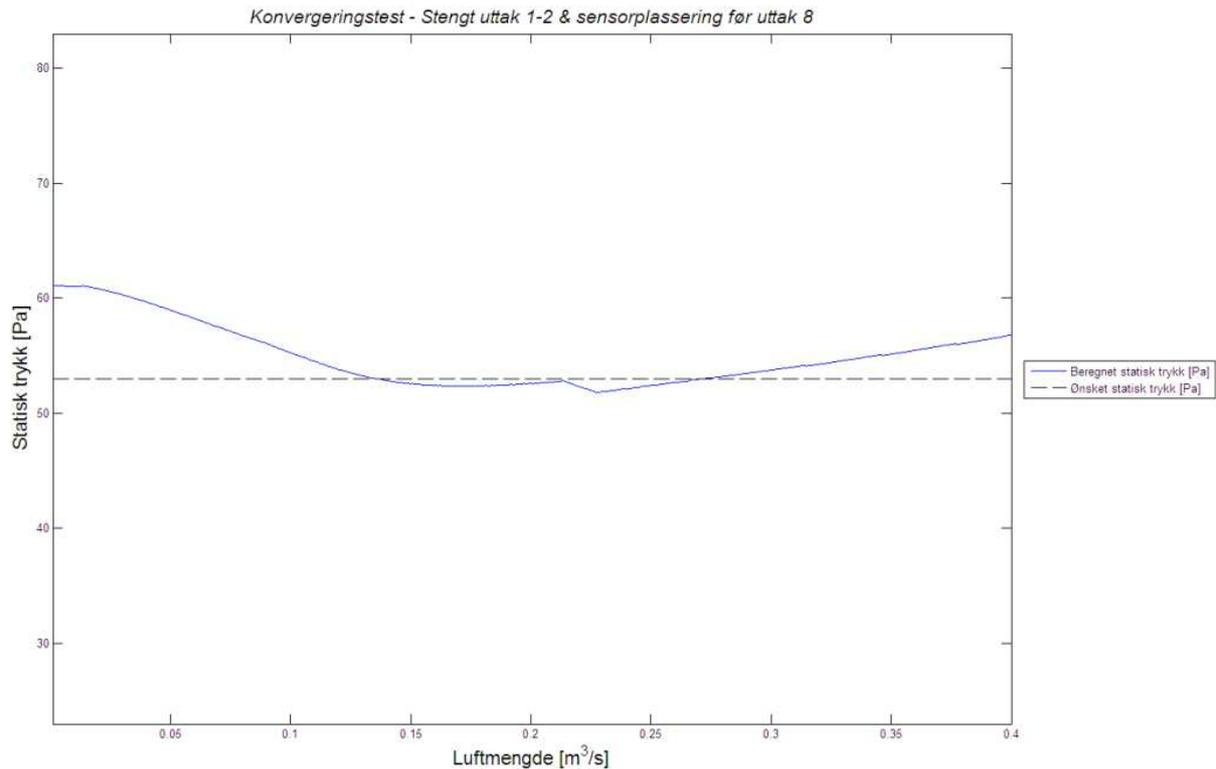


Figur 8-3. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 1 og 2 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 10 i en hovedkanal med lik dimensjon. Diagrammet er produsert i Matlab.

Figur 8-3 viser en fin graf for sammenligning av beregnet og ønsket statisk trykk. Beregnet statisk trykk krysser kurven for ønsket statisk trykk, og i tilfeller med krav om 0 Pa i avvik, ville det vært en konsistent løsning for hovedluftmengden som må til for å oppnå ønsket statisk trykk i det aktuelle punktet. Beregningen konvergerer og resultatene for luftmengdefordeling i dette scenarioet er også pålitelige.

For noen scenarioer registrerte gruppen noen veldig interessante resultater gjennom konvergenstesten som er verdt å presentere i seg selv. Figur 8-4 viser et eksempel på dette. Beregningene som ble gjennomført for luftmengdefordeling er et resultat av et krav til avvik mellom beregnet og ønsket statisk trykk på 2,5 Pa. I tilfelle under oppnå konvergering i beregningene, men det er verdt å merke seg konsekvensen av å redusere dette avviket. Først og fremst spenner løsning for hovedluftmengde seg fra rundt 0,1 til over 0,3 m³/s, men dette er en konsekvens av at det tillatte avviket.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-4. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 1 og 2 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 8 i en dimensjonert hovedkanal. Diagrammet er produsert i Matlab.

Hvis det ikke tillattes avvik burde det derimot være én løsning for hovedluftmengde, men i figuren over ser man at et slikt krav faktisk gir to (og nesten tre) matematiske løsninger. Dette stilles spørsmålsteget ved om dette problemet også eksisterer i praktiske sammenheng.

8.3 Beregninger av luftmengdefordeling med konstant statisk trykk

En av beregningsmodellene gikk ut på å velge forskjellige plasseringer av trykksensor, for så å stenge luftmengden ulike rom. Videre ble luftmengden justert for å opprettholde et konstant statisk trykk der sensoren ble valgt plassert. Deretter ble luftmengdefordelingen undersøkt i de forskjellige scenarioene. Dette ble gjort for å undersøke ulike sensorplasseringer i forhold til reguleringsmulighet og luftmengdefordeling.

Disse beregningene ble gjort for to forskjellige kanalnett, begge med 10 uttakskanaler. Det ene var prosjektert for å opprettholde en valgt hastighet (3-5 m/s) i hovedkanalen, mens det andre kanalnett hadde lik dimensjon gjennom hele hovedkanalen. For å forsøke å simulere gode og mindre gode reguleringsystemer og videre undersøke hva dette utgjorde i resultatene, ble beregningene utført med forskjellige steg i justering av hovedluftmengde. I sammenstilling 1-6 ble disse gjort med en faktor på 0,05, altså en relativt unøyaktig justering. Disse ble sammenlignet med sammenstilling 7-16 hvor denne faktoren ble valgt til 0,00001, som er en mye mer nøyaktig justering. Hvordan hovedluftmengden i kanalnett ble justert er forklart i metodekapittelet 7.2.3.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

8.3.1 Resultater og diskusjon

For å unngå mye repetisjon i teksten som følger under, blir sensorplasseringene i mange tilfeller omtalt på følgende måte:

S2	Sensor plassert før uttak 2
S4	Sensor plassert før uttak 4
S6	Sensor plassert før uttak 6
S8	Sensor plassert før uttak 8
S10	Sensor plassert før uttak 10

For å undersøke forskjellen i luftmengdefordeling ved ulike sensorplasseringer ble disse samlet i felles grafikk. Disse er videre kalt sammenstillinger. For komplett oversikt over utførte beregninger og hva de ulike sammenstillingene innebærer av uttak som stenges og sensorplassering, se Tabell 8-1.

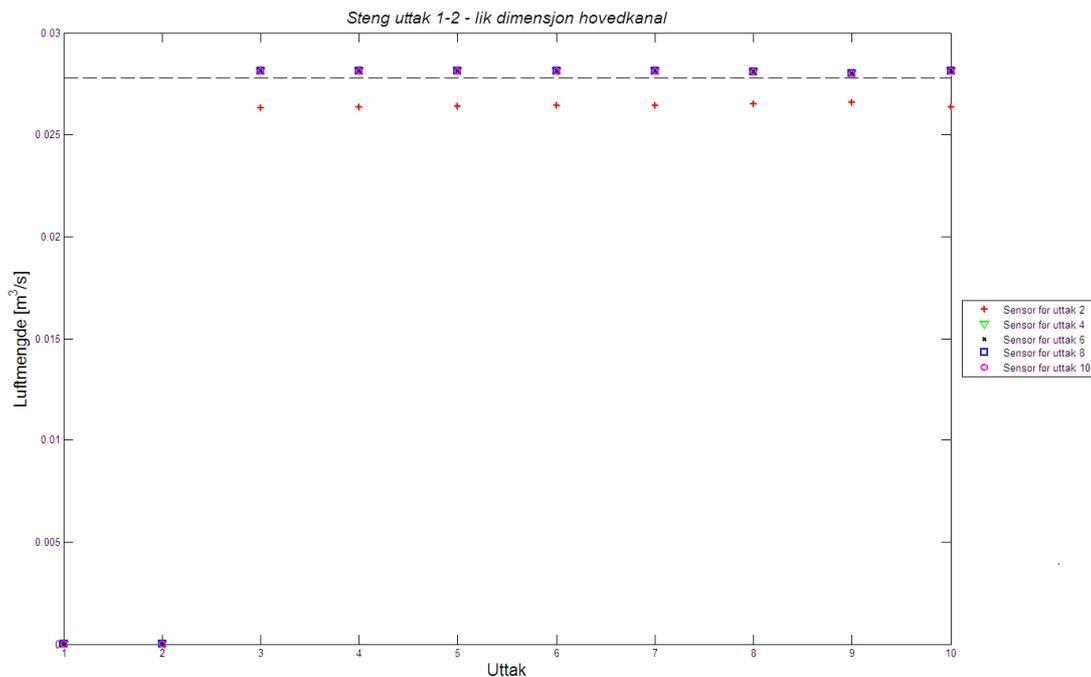
Tabell 8-1. Tabellen viser en oversikt med de ulike sammensetningene, sensorplassering og hvilke av beregningene som hadde en matematisk løsning. Grønn farge indikerer at beregningen konvergerer, rød farge indikerer at beregningen ikke konvergerer og har dermed ingen matematisk løsning.

	Sensorplassering					Konvergens		Sensorplassering					Konvergens		
	2	4	6	8	10			2	4	6	8	10			
Sammenstilling 1 - Steng uttak 1 & 2 - Lik dimensjon hovedkanal	x					Green	Sammenstilling 9 - Steng uttak 9 & 10 - Lik dimensjon hovedkanal	x					Green		
		x							x						
			x								x				
				x								x			
					x									x	
Sammenstilling 2 - Steng uttak 5 & 6 - Lik dimensjon hovedkanal	x					Green	Sammenstilling 10 - Steng uttak 1 & 2 - Dimensjonert hovedkanal	x					Green		
		x							x						
			x								x				
				x								x			
					x									x	
Sammenstilling 3 - Steng uttak 9 & 10 - Lik dimensjon hovedkanal	x					Green	Sammenstilling 11 - Steng uttak 5 & 6 - Dimensjonert hovedkanal	x					Green		
		x							x						
			x								x				
				x								x			
					x									x	
Sammenstilling 4 - Steng uttak 1 & 2 - Dimensjonert hovedkanal	x					Green	Sammenstilling 12 - Steng uttak 9 & 10 - Dimensjonert hovedkanal	x					Red		
		x							x						
			x								x				
				x								x			
					x									x	
Sammenstilling 5 - Steng uttak 5 & 6 - Dimensjonert hovedkanal	x					Red	Sammenstilling 13 - Steng uttak 1 til 4 - Lik dimensjon hovedkanal	x					Green		
		x							x						
			x								x				
				x								x			
					x									x	
Sammenstilling 6 - Steng uttak 9 & 10 - Dimensjonert hovedkanal	x					Red	Sammenstilling 14 - Steng uttak 4 til 7 - Dimensjonert hovedkanal	x					Green		
		x							x						
			x								x				
				x								x			
					x									x	
Sammenstilling 7 - Steng uttak 1 & 2 - Lik dimensjon hovedkanal	x					Green	Sammenstilling 15 - Steng uttak 7 til 10 - Lik dimensjon hovedkanal	x					Red		
		x							x						
			x								x				
				x								x			
					x									x	
Sammenstilling 8 - Steng uttak 5 & 6 - Lik dimensjon hovedkanal	x					Green	Sammenstilling 16 - Steng uttak 7 til 10 - Dimensjonert hovedkanal	x					Red		
		x							x						
			x								x				
				x								x			
					x									x	

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Sammenstilling 1-3

I disse beregningene undersøkes ulike plasseringer av trykksensor (før uttak 2, 4, 6, 8 og 10) ved å stenge av to uttak, på forskjellige steder i kanalnettet. Videre blir luftmengdefordelingen mellom kanaluttakene undersøkt i forhold til hvilke uttak som stenges. Kanalutformingen i dette tilfellet var lik dimensjon på hovedkanal.



Figur 8-5. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 1-2 stenges (sammenstilling 1). Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 1

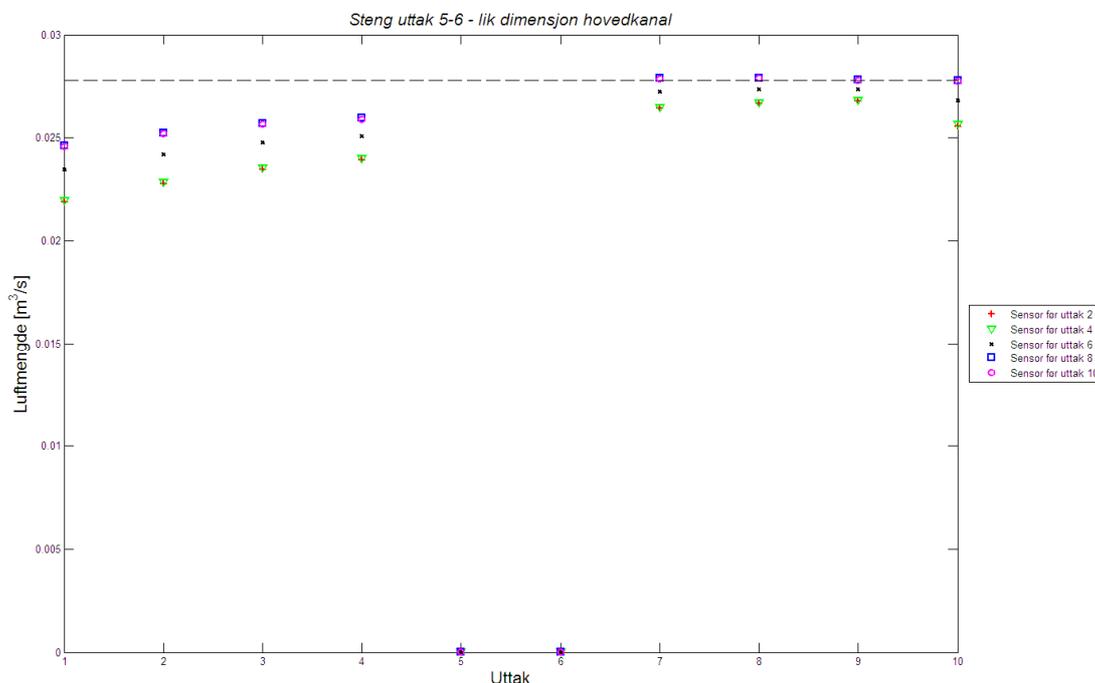
Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

I dette tilfellet stenges de to første kanaluttakene (uttak 1 og 2). Som Figur 8-5 viser, skiller luftmengdefordelingen ved plassering av trykksensor før uttak 2 seg ut. Samtlige kanaluttak ved denne plasseringen får for lite luft. I de andre sensorplasseringene er luftmengdefordelingen identisk, hvor samtlige uttak får noe mer luft enn ønsket. I dette tilfellet vil sensorplassering være ubetydelig, så lenge den plasseres ved eller etter uttak 4.

Da samtlige sensorplasseringer gir beregninger som konvergerer, er det grunn til å anta at løsningene er pålitelige. Når det gjelder luftmengdefordelingen ved regulering hovedluftmengde etter sensor S2, stilles det spørsmålsteget rundt hvorfor denne gir resultater som avviker i forhold til de andre sensorplasseringene. Dette kan ha noe med

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

nøyaktigheten til luftmengdereguleringen å gjøre. Det vil mest antagelig ikke ha noe å gjøre med det tillatte avviket mellom differanse i statisk trykk, da denne beregningen, på lik linje med de andre, konvergerer. De andre sensorplasseringene gir identiske luftmengder per uttak, og en forklaring på dette er trolig at disse luftmengdene blir styrt av sensorer som er plassert etter de uttakene som stenges.



Figur 8-6. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 5-6 stenges (sammenstilling 2). Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 2

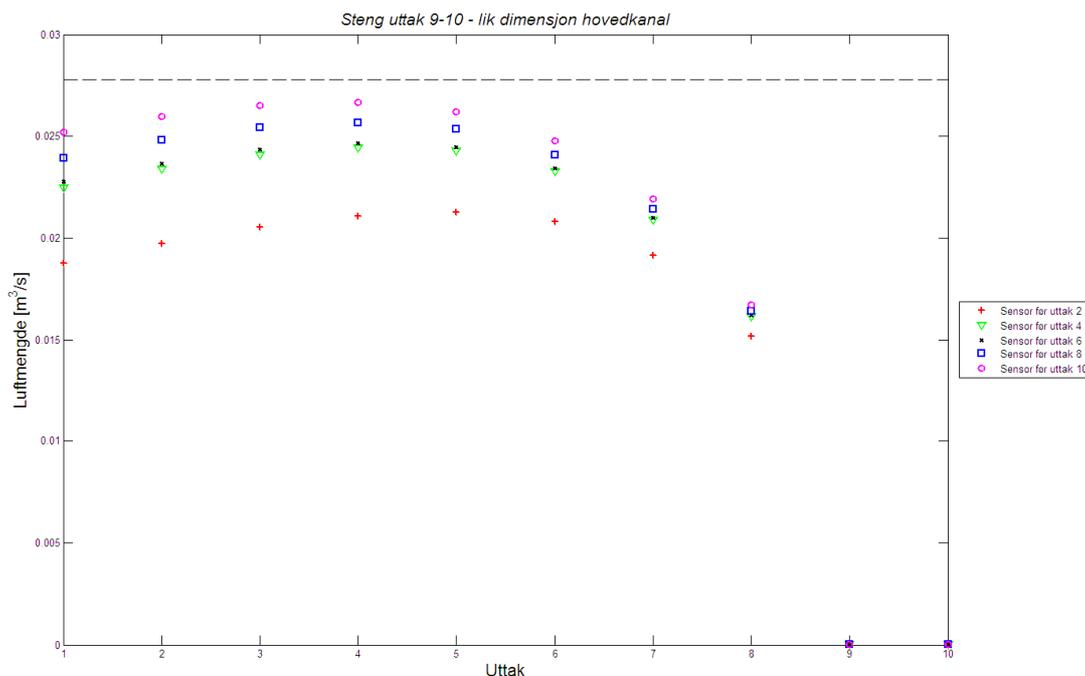
- Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

Her beregnes luftmengdefordelingen når uttak 5 og 6 stenges. Som Figur 8-6 viser, får de første fire uttakene ikke tilstrekkelig luft uansett plassering av trykksensor. Luftmengdefordelingen er dårligst for uttakene når hovedluftmengden blir regulert av sensorene som befinner seg før uttakene som blir stengt (S2 og S4). Som figuren viser er luftmengdefordelingen betraktelig bedre for S8 og S10, hvor S10 er best i dette tilfellet. Luftmengdene i uttakene 7-10 er betraktelig bedre generelt sett, men meget god når hovedluftmengden blir regulert etter S8 og S10.

I dette tilfellet er det stor variasjon i luftmengdene i de forskjellige uttakene. I og med at beregningene konvergerer, antas det igjen at verdiene er pålitelige. Grunnen til at luftmengdene i de fire første uttakene er lavest for S2 og S4, kan forklares ved at disse er plassert før uttakene som stenges, og trolig merker trykkendringene i mindre grad enn sensorene som er plassert etter de stengte uttakene. Som figuren viser, er luftmengdene i uttak 1-4 betraktelig høyere når det reguleres etter S8 og S10. En annen grunn er trolig

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

at trykkfallene over de ulike spjeldene er låst. De låste trykkfallene er basert på normal drift hvor alle uttak har maksimal luftmengde, og uttak 1-4 har dermed trykkfall over spjeld som er høyere enn nødvendig for den aktuelle luftmengden. Dette gjelder også uttakene 7-10, som nå har et lavere trykkfall enn nødvendig. Når det gjelder luftmengdene i uttak 7-10, er samtlige betraktelig nærmere prosjekterte luftmengder generelt og tilnærmet lik prosjektert verdi for luftmengdene som styres av S8 og S10 spesielt.



Figur 8-7. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 9-10 stenges (sammenstilling 3). Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 3

Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

I Figur 8-7 har uttak 9 og 10 blitt stengt. Samtlige uttak som ikke stenges resulterer i for lave luftmengder i forhold til ønsket, uavhengig av sensorplassering. Som figuren viser er det S10 som gir høyest luftmengder i de ulike uttakene, mens S2 gir lavest. Regulering av hovedluftmengde ved hjelp av sensoren plassert før uttak 2, gir meget lave luftmengder i samtlige uttak, dette er mest sannsynlig på grunn av en dårlig plassering av trykksensor. Den generelle trenden er at sensorene som er plassert tidlig i kanalnettet fører til lavest luftmengde, mens de som er plassert mot slutten gir høyest.

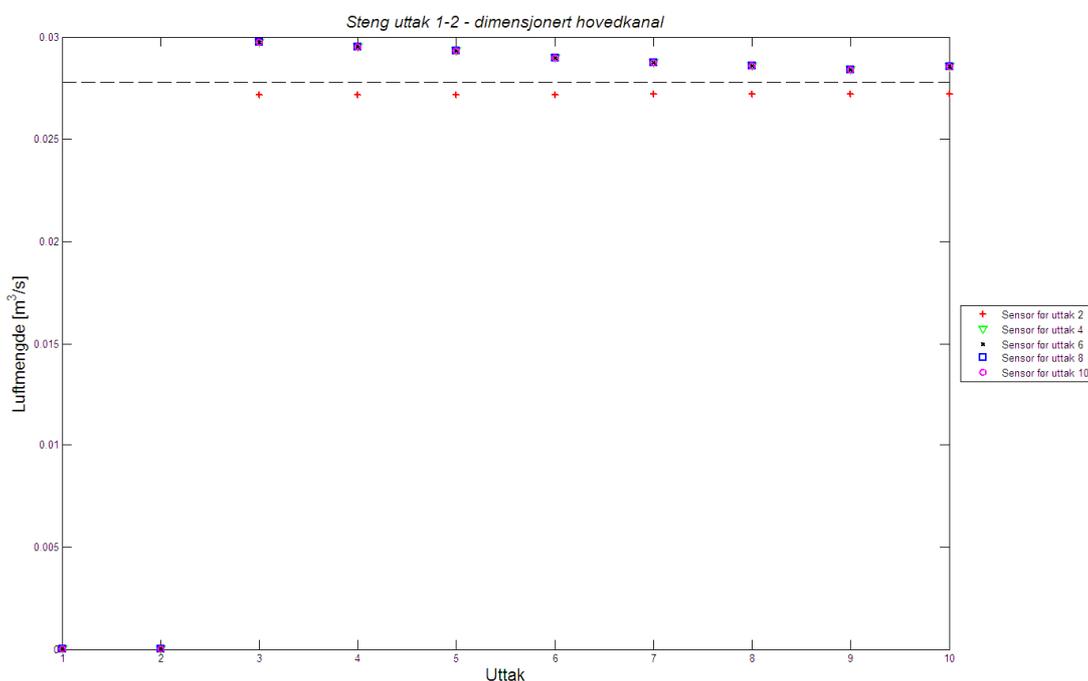
I tilfellene hvor de siste uttakene på kanalnettet stenges, blir resultatene noe merkelige. I likhet med de andre beregningene er trykkfallene over spjeldene låst. Trykkfallet over spjeldene som ikke er stengt (1-8) blir dermed for høye i forhold til hva trykkfallet ideelt sett burde være og dette resulterer igjen i lave luftmengder. Hvis den dårlige

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

luftmengdefordelingen i hvert av uttakene kun er forårsaket på bakgrunn av låste spjeldtrykkfall, ville luftmengdene i de forskjellige uttakene, trolig vært nokså jevn. Som figuren viser, er luftmengdene i uttak 6-8 betraktelig lavere enn ønsket. Dette er et fenomen som antakelig må ha noe med en mindre god registrering av statiske trykkendringer. Det kan også muligens forklares med hvordan kontinuitetsprinsippet er implementert i beregningene av luftmengder (ytterligere forklart i kapittel 7.2).

Sammenstilling 4-6

I sammenstilling 4-6 utføres nøyaktig de samme beregningene som i sammensetning 1-3. Forskjellen er at det benyttes en dimensjonert hovedkanal i de følgende beregningene, i stedet for lik dimensjon. Det vil si at kanalen er dimensjonert slik at det opprettholdes en hastighet mellom 3-5 m/s.



Figur 8-8. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensorer når uttak 1-2 stenges (sammenstilling 4). Diagrammet er produsert i Matlab.

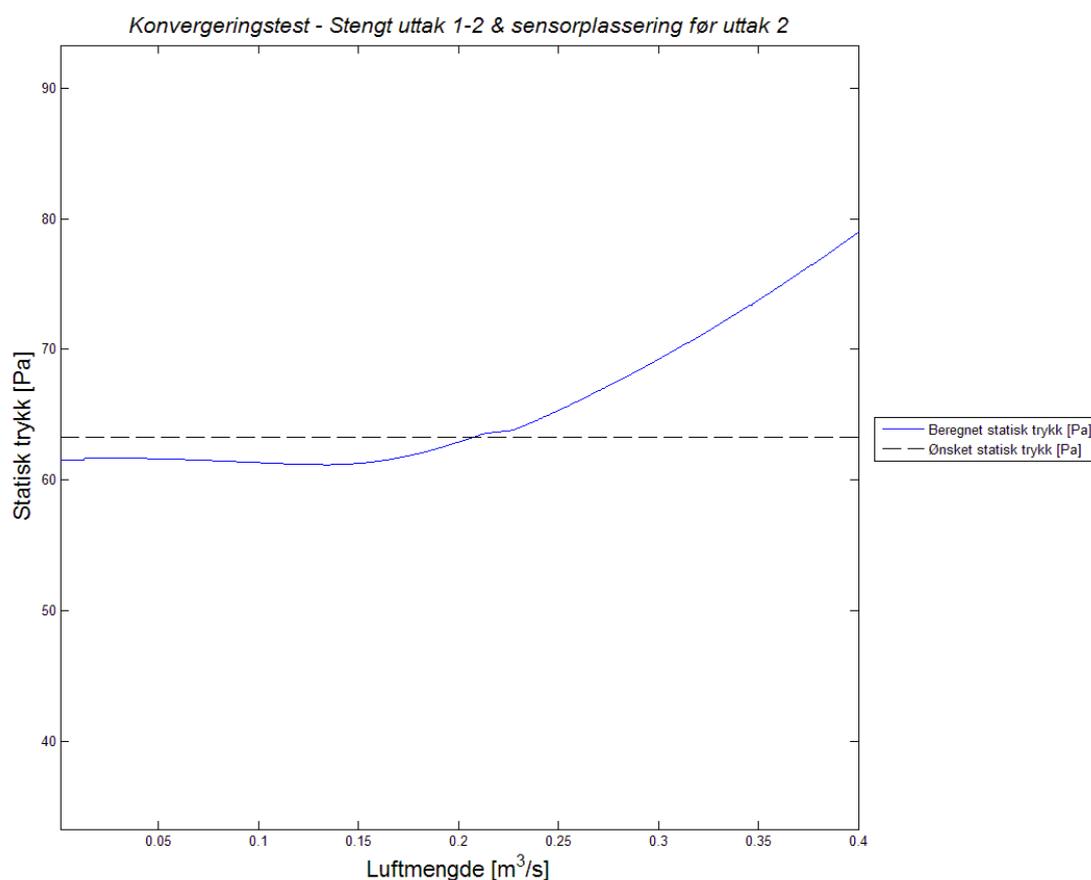
Sammenstilling 4

Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

Under disse beregningene, ble uttakene 1 og 2 stengt, se Figur 8-8. Det kommer frem av figuren at luftmengdefordelingen med sensor før uttak 2 skiller seg ut. Som i sammensetning 1 ligger disse luftmengdene en anelse under ønsket verdi. Luftmengdefordelingen for de andre sensorplasseringene er helt identiske. I dette tilfellet registreres det at luftmengden i uttak 3 er noe høy, og den synker gradvis utover i uttakene og får en liten økning i siste uttak.

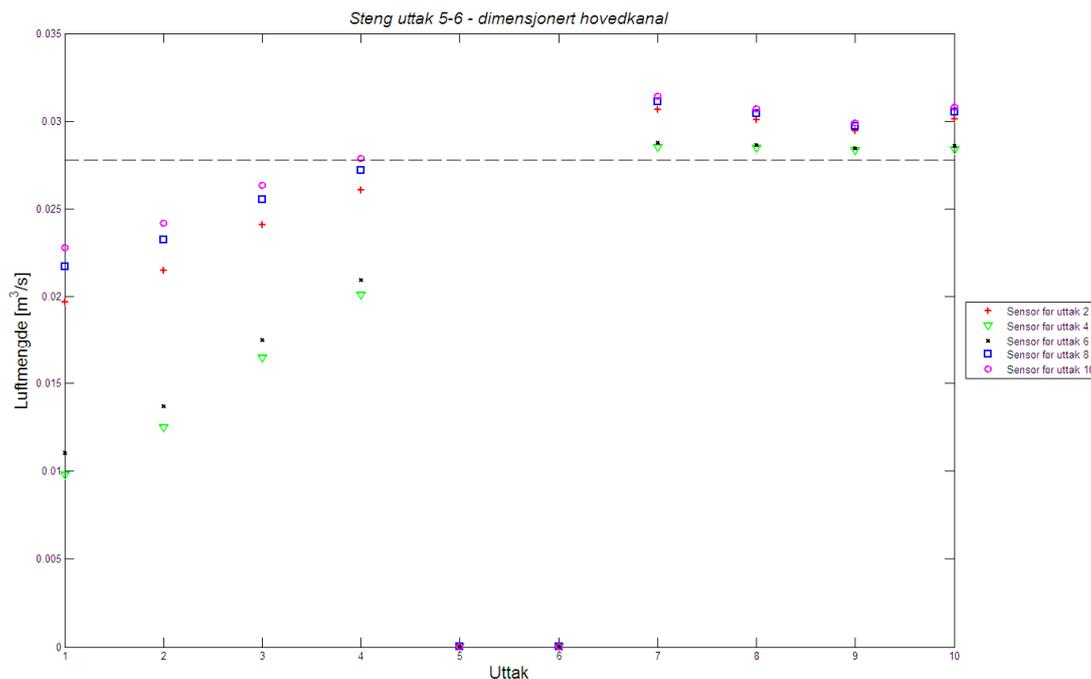
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

I sammensetning 4 konvergerer samtlige beregninger, så resultatene antas å være holdbare. Grunnen til at luftmengdene i uttakene er høyere enn ønsket for S4-10, er trolig et resultat av en høy hovedluftmengde som i dette tilfellet har flere løsninger på grunn av at valgt krav til differanse (2,5 Pa) mellom beregnet og ønsket statisk trykk, noe Figur 8-4 viser. Hvilken luftmengde regneverktøyet da velger for de aktuelle sensorplasseringene kan være noe vilkårlig i slike tilfeller, og er blant annet avhengig av hvilke verdi som velges som utgangspunkt i slike iterasjonsberegninger. Luftmengden i uttakene kunne like gjerne vært noe lavere enn ønsket, men poenget er at luftmengdefordelingen er god. Luftmengdene i uttakene hvor hovedluftmengde er regulert av S2 er derimot nærmere ønsket verdi, dog noe lavere. Som Figur 8-9 viser, er det kun et lite område for hovedluftmengder som gir en matematisk løsning i den aktuelle beregningen. Dette er grunnen til at hovedluftmengden er annerledes i forhold til de andre sensorplasseringene.



Figur 8-9. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 1 og 2 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 2 i en dimensjonert hovedkanal. Diagrammet er produsert i Matlab.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-10. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 5-6 stenges (sammenstilling 5). Diagrammet er produsert i Matlab.

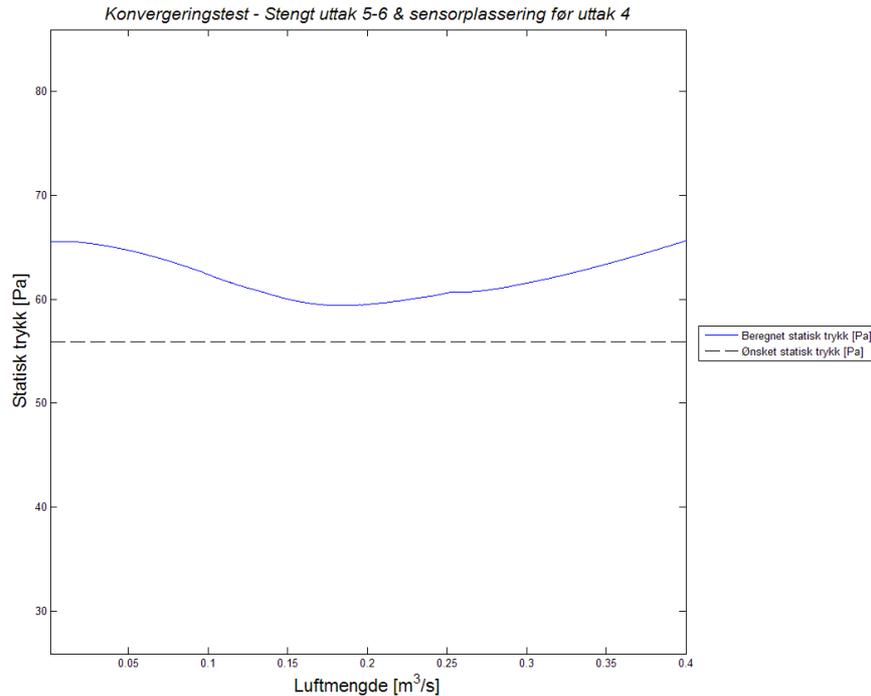
Sammenstilling 5

- Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

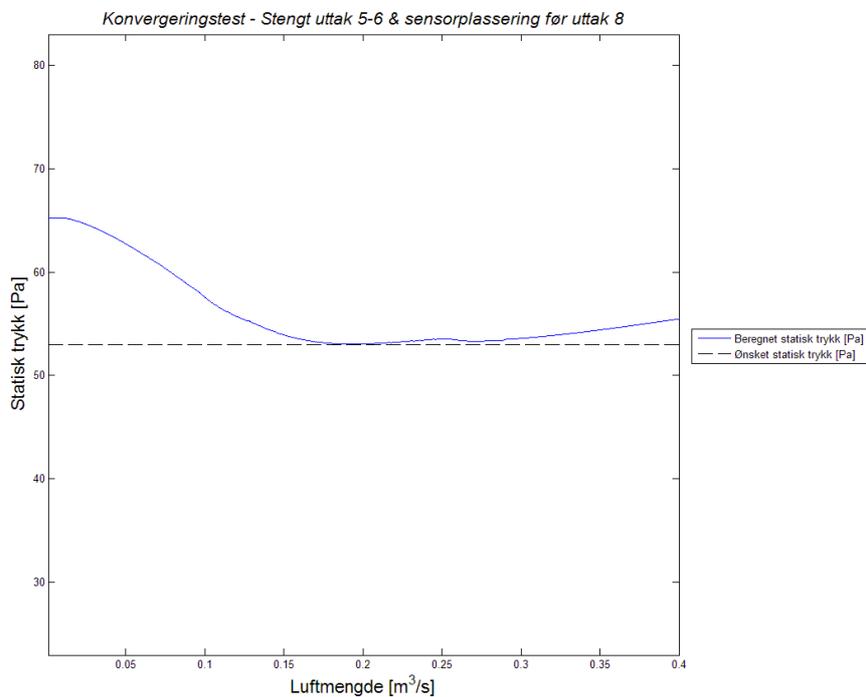
For denne sammenstillingen er det uttak 5 og 6 som stenges. Luftmengdene er nokså lave i uttakene 1-3. Som figuren viser får uttak 1 lave luftmengder, spesielt der hovedluftmengden har blitt styrt av sensorene før uttak 4 og 6. Videre stiger luftmengden i uttakene. Luftmengdene blir nærmest ønsket verdi når sensoren er plassert før uttak 10 og dårligst for S4, når det gjelder uttakene 1-4. Videre snur denne trenden når man ser på luftmengdefordelingen for uttak 7-10. Her er luftmengdene nærmest ønsket verdi, når det styres etter S4 og S6. For de andre sensorene er luftmengdene noe høyere enn ønsket, hvor S10 igjen resulterer i høyest verdi.

I denne sammenstillingen konvergerer ikke beregningene for regulering av hovedluftmengde etter S4 og S6. Grunnen til dette er at det ikke finnes noen matematisk løsning. Som Figur 8-11 viser, vil ikke det faktiske statiske trykket i for S4 havne innenfor kravet som er satt til avvik i forhold til ønsket verdi. Det samme gjelder for S6. Når det gjelder de andre beregningene som faktisk konvergerer, skyldes den dårlige luftmengdefordelingen trolig låste trykkfall over spjeld. Mulige løsninger av hovedluftmengde for eksempel S8 vises i Figur 8-12.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

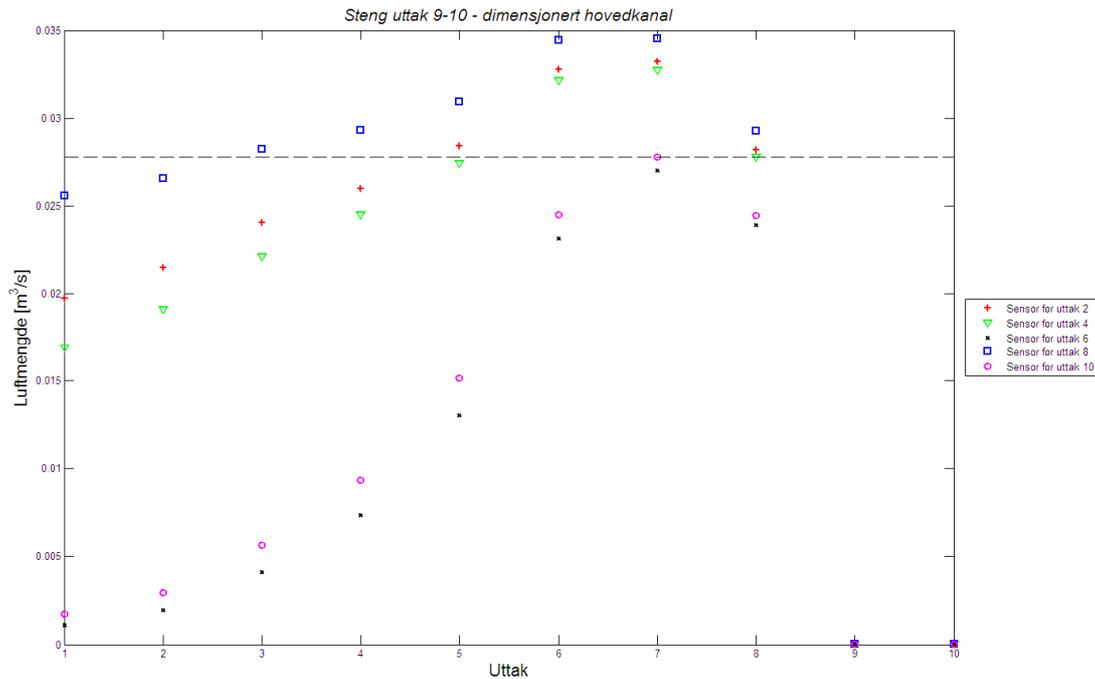


Figur 8-11. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 5 og 6 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 4 i en dimensjonert hovedkanal. Diagrammet er produsert i Matlab.



Figur 8-12. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 5 og 6 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 4 i en dimensjonert hovedkanal. Diagrammet er produsert i Matlab.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



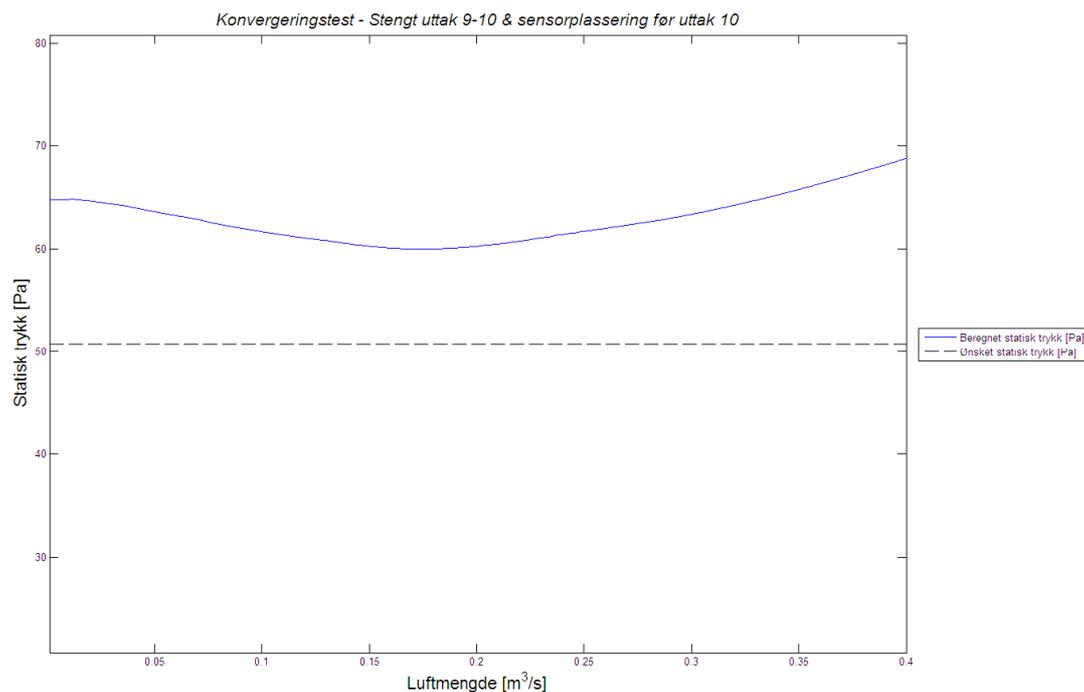
Figur 8-13. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulik plassering av trykksensor når uttak 9-10 stenges (sammenstilling 6). Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 6

- Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer ikke

Figur 8-13 viser luftmengdefordelingen i uttak 1-8, når uttak 9 og 10 stenges. Luftmengdefordelingen er meget skjevfordelt i samtlige uttak, og grunnen til dette er sannsynligvis fordi ingen av beregningene konvergerer. Figur 8-14 viser det statiske trykket i forhold til ulike hovedluftmengder, og grafen viser tydelig at det ikke vil være noen mulige løsninger med valgt krav til avvik på 2,5 Pa. Det samme gjelder for de resterende sensorplasseringene, se vedlegg 13.

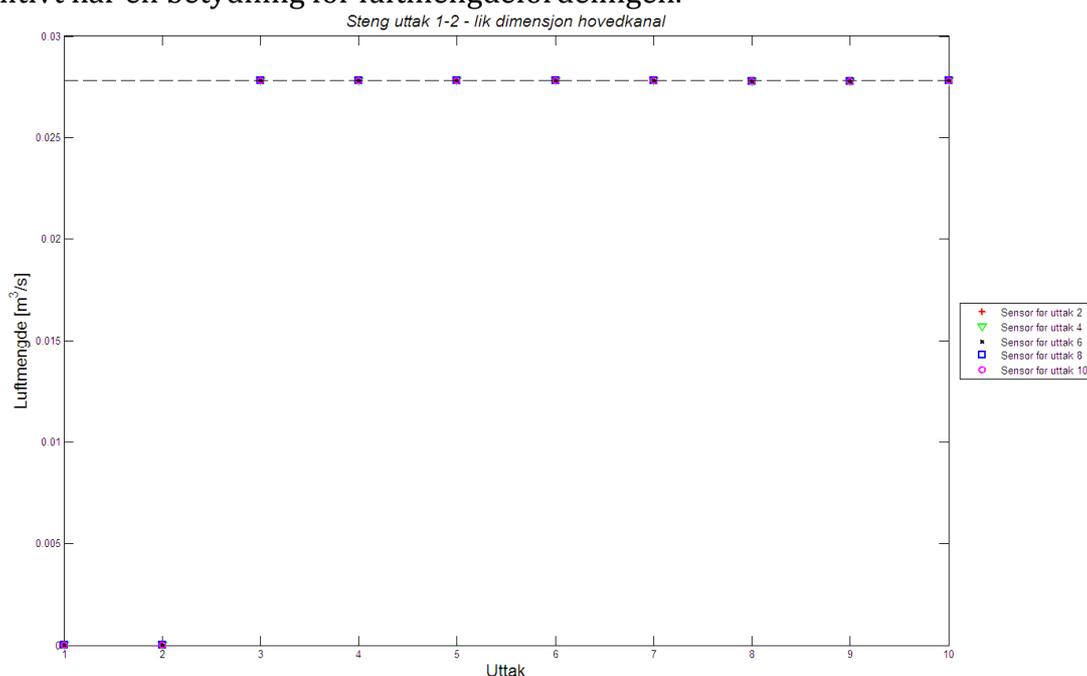
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-14. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 9 og 10 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 10 i en dimensjonert hovedkanal. Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 7-12

I sammenstilling 7-12 er kanalnettene identisk som i sammenstilling 1-6. Forskjellene i de påfølgende beregningene er at justering av hovedluftmengde er gjort på en mer nøyaktig stegvis skala. Resultatene som følger vil vise at denne økningen i nøyaktighet definitivt har en betydning for luftmengdefordelingen.



Figur 8-15. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 1-2 stenges (sammenstilling 7). Diagrammet er produsert i Matlab.

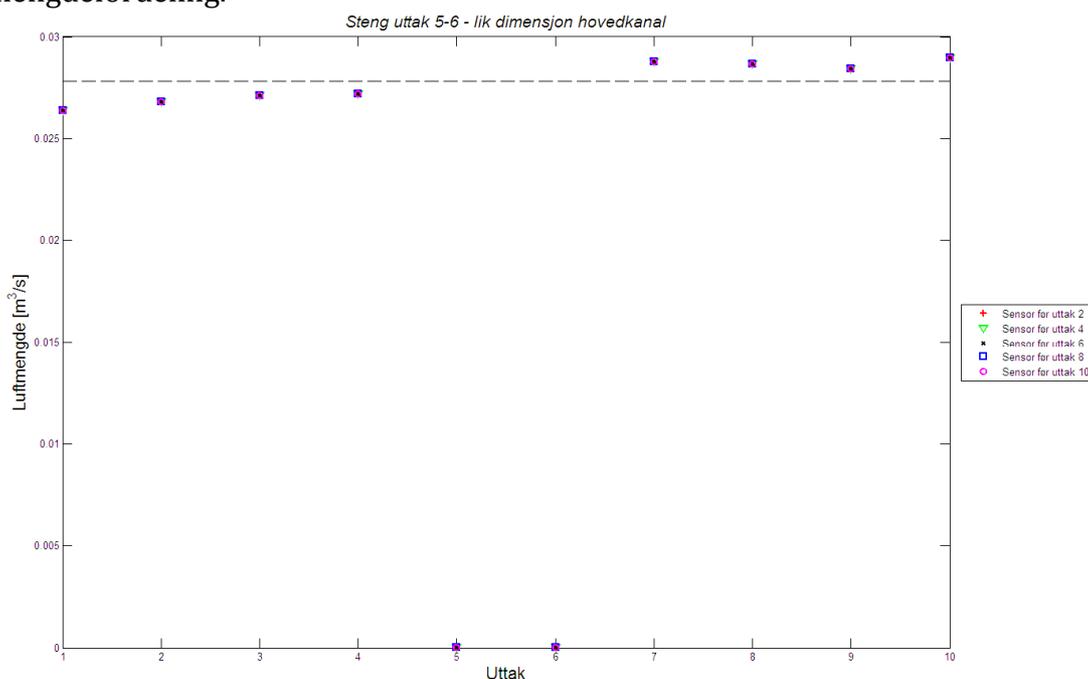
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Sammenstilling 7:

Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

I dette tilfellet stenges uttak 1 og 2. Som Figur 8-15 viser, er luftmengdefordelingen identisk for samtlige uttak, uavhengig av sensorplassering. Luftmengdene er også nøyaktig lik ønsket verdi.

Samtlige beregninger konvergerer, og er med andre ord troverdige. Det faktum at sensorplassering er ubetydelig ved stenging av uttak 1 og 2, er interessante resultater. Grunnen til at sensorplassering er uvesentlig, er trolig på grunn av den mer nøyaktige reguleringen av hovedluftmengde. Differansen mellom de konstante trykkene og de faktiske statiske trykkene i de ulike punktene (S2, S4, S6, S8 og S10), er sannsynligvis meget liten og dette medfører en optimal hovedluftmengde og dermed en god luftmengdefordeling.



Figur 8-16. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulik plassering av trykksensor når uttak 5-6 stenges (sammenstilling 8). Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 8

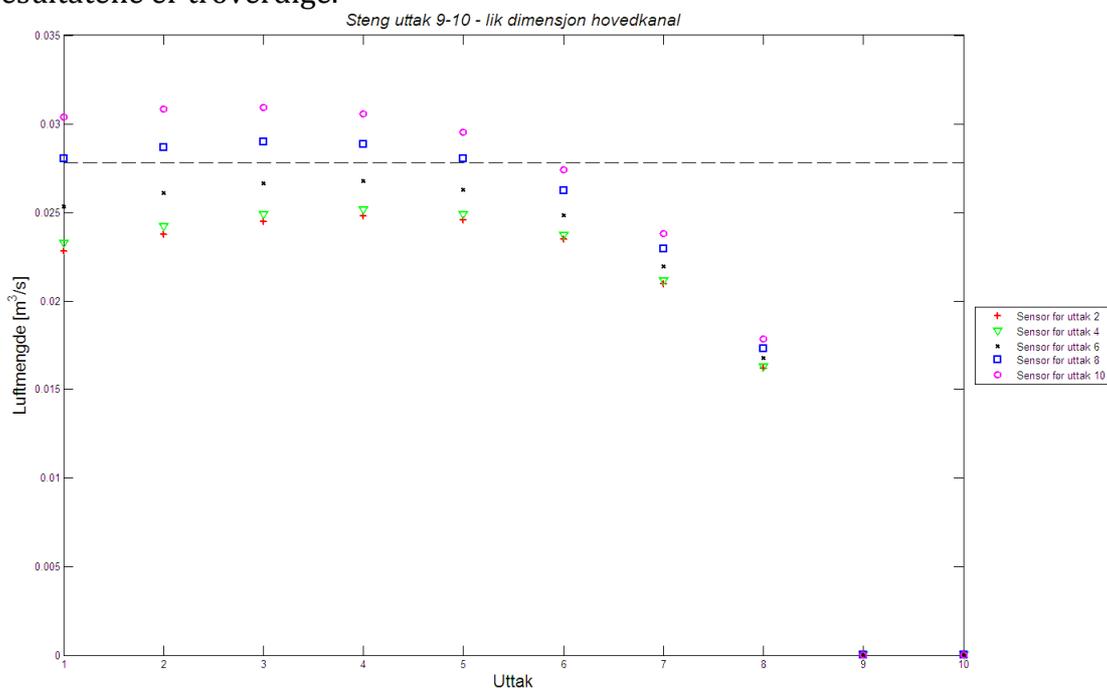
Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

I sammenstilling 8 stenges uttak 5 og 6. I dette tilfellet gjelder det samme som i sammenstilling 7, luftmengdene i de forskjellige uttakene er identiske. Luftmengdene i

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

uttak 1-4 er dog noe lave, mens de er en anelse høye i uttak 7-10. Resultatene viser at sensorplassering ikke har betydning for regulering av hovedluftmengde.

På lik linje med sammenstilling 2 og 4 er luftmengdefordelingen i uttakene 1-4 for lav og 7-10 for høy. Dette skyldes trolig låste trykkfall over spjeld, som ikke er tilpasset det aktuelle tilfellet av stengte uttak. Beregningene har matematiske løsninger så det antas at resultatene er troverdige.



Figur 8-17. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 9-10 stenges (sammenstilling 9). Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 9

Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer ikke

Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer

Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer

Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer

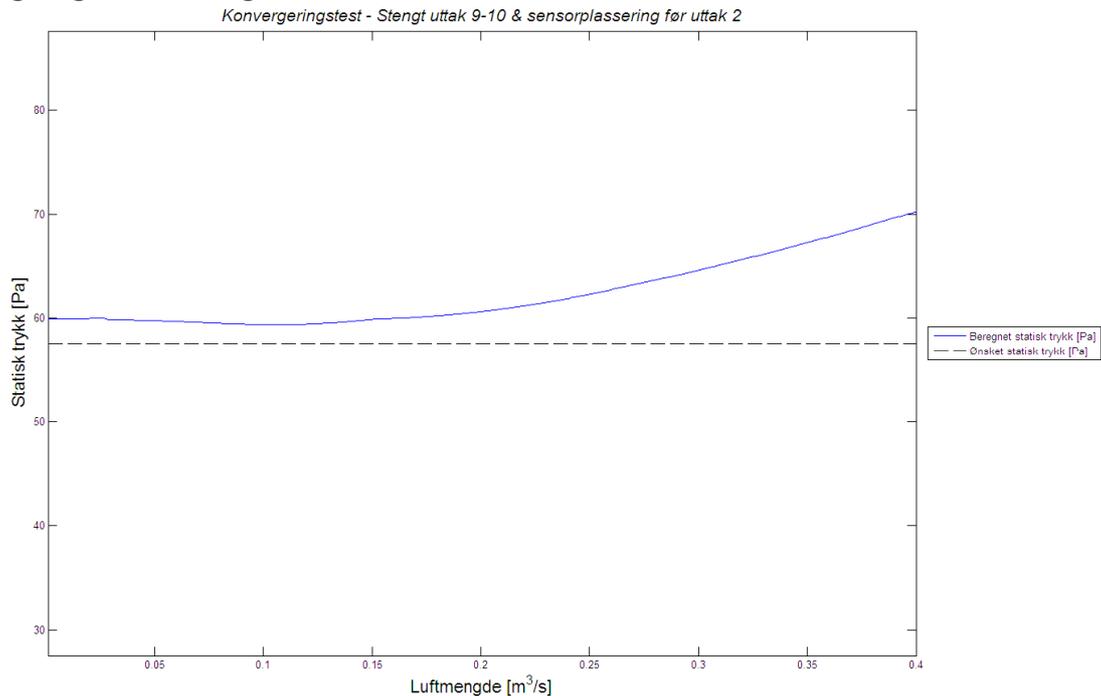
Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

Som Figur 8-17 viser, stenges uttak 9 og 10 i denne beregningen. Luftmengdene i de ulike uttakene følger en lik trend. De stiger en anelse fra uttak 1 til 2 og synker gradvis utover kanalnettet fra om med uttak 4 til uttak 8. I dette tilfellet er luftmengdene som er regulert etter S10 kontinuerlig høyest, mens lavest for når det reguleres etter S2.

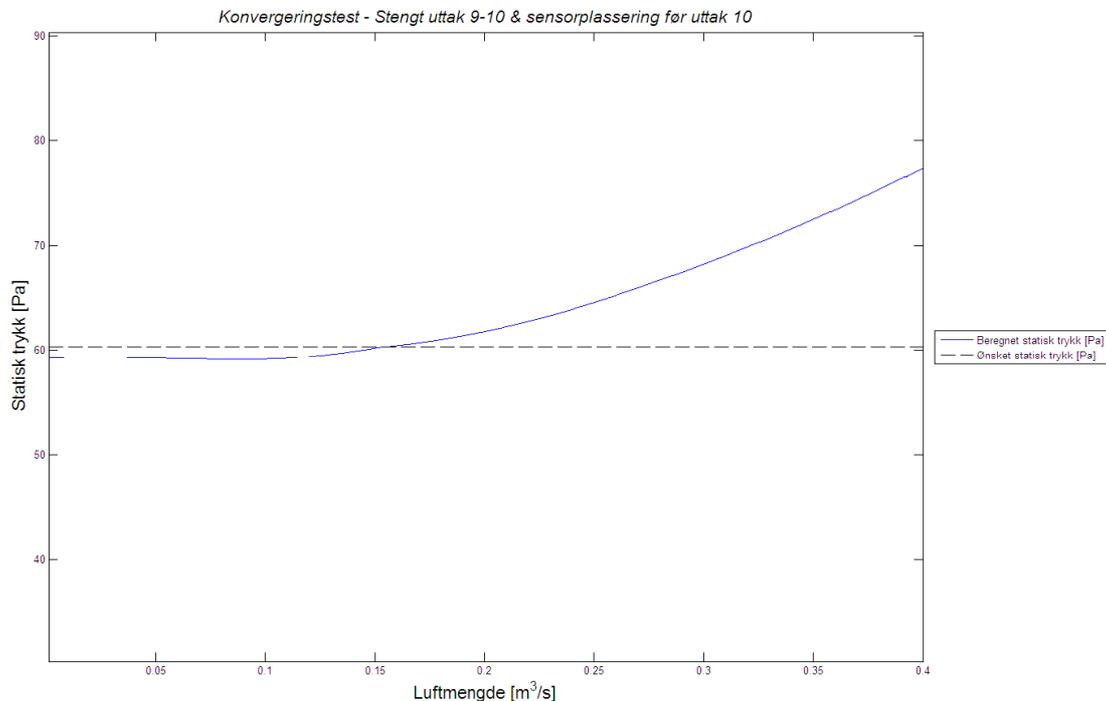
Grunnen til at beregningen ikke konvergerer i tilfellet hvor hovedluftmengden blir regulert av S2 vises i Figur 8-18. Som figuren viser, finnes det ingen matematisk løsning i dette tilfellet, da beregnet statisk trykk så vidt ikke kommer seg under kravet til avvik på 2,5 Pa. Figur 8-19 derimot, viser at det finnes løsning når hovedluftmengden reguleres etter S10. Når det gjelder den dårlige luftmengdefordelingen, er dette et fenomen som er vanskelig å forklare i og med at beregningene konvergerer for S4-S10. Noe av forklaringen kan på lik linje med andre resultatene forklares på bakgrunn av låste

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

trykkfall over spjeld, samt hvordan kontinuitetsprinsippet er implementert for beregning av luftmengder.

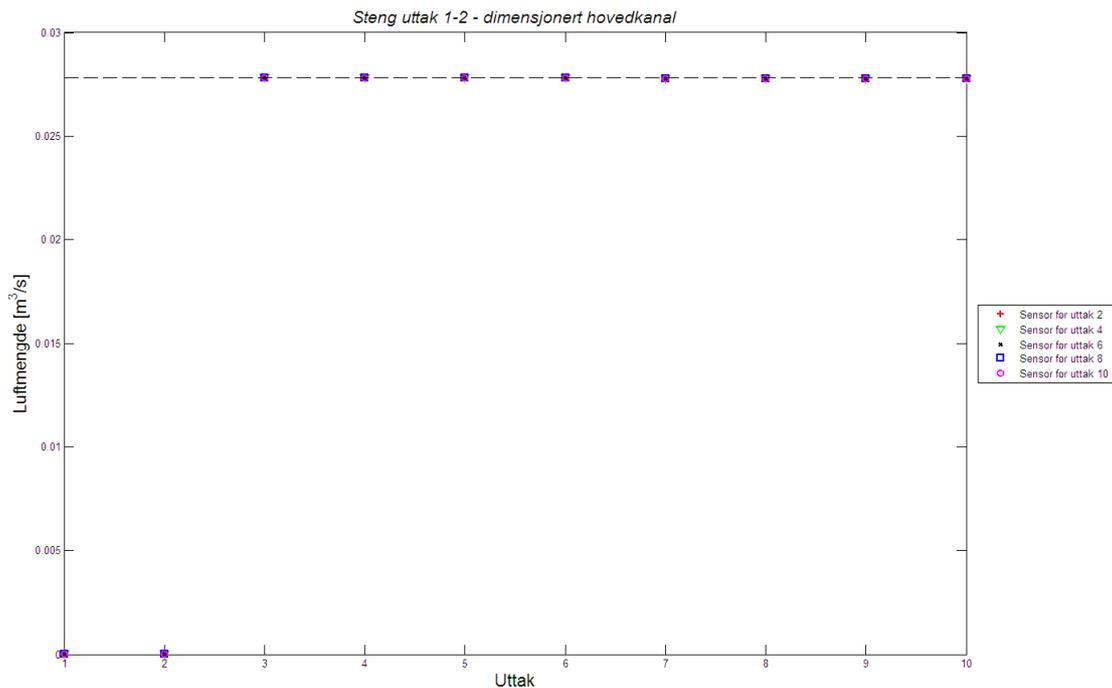


Figur 8-18. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 9 og 10 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 2 i lik dimensjon på hovedkanal. Diagrammet er produsert i Matlab.



Figur 8-19. Grafen viser beregnet statisk trykk ved ulike hovedluftmengder i forhold til ønsket statisk trykk (stiplet linje). Beregningen gjelder når uttak 9 og 10 stenges og statisk trykk holdes konstant før uttak 10 i lik dimensjon på hovedkanal. Diagrammet er produsert i Matlab.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-20. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensorer når uttak 1-2 stenges (sammenstilling 10). Diagrammet er produsert i Matlab.

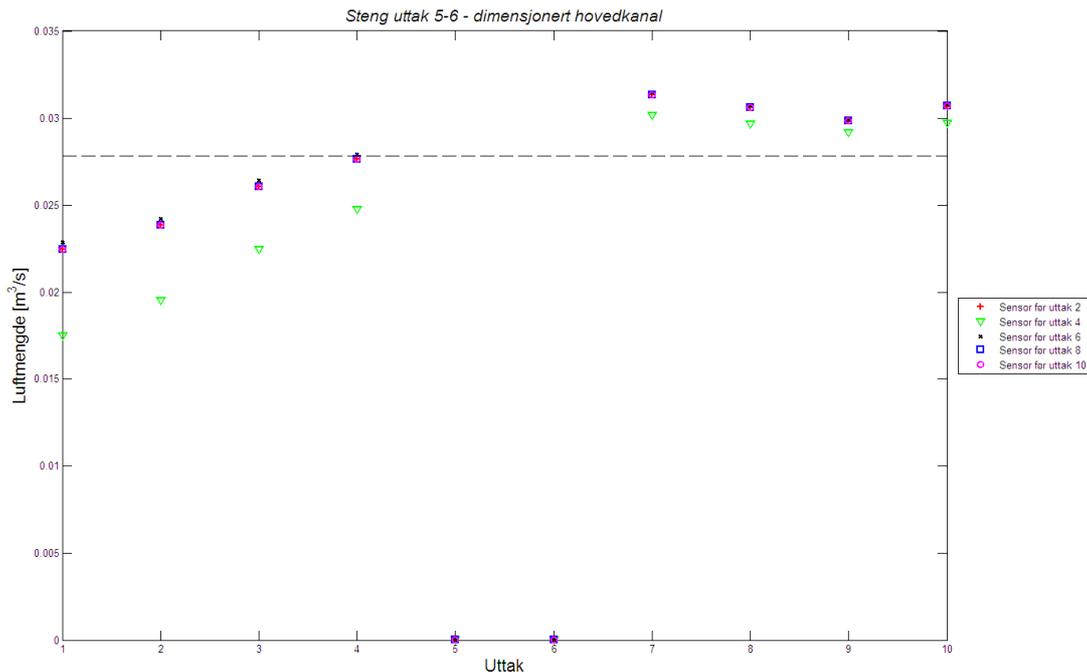
Sammenstilling 10

Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

I denne beregningen stenges uttak 1 og 2. Figur 8-20 viser at sensorplassering er uvesentlig på lik linje som sammenstilling 7 og 8. Alle uttak får lik luftmengde som ønsket.

Samtlige beregninger konvergerer, og resultatene er dermed troverdige. Figuren viser at justering av hovedluftmengden med mer nøyaktige steg, har stor betydning for luftmengdene i uttakene. I motsetning til sammenstilling 4, hvor luftmengdene i uttakene enten var for høye eller for lave, er de i dette tilfellet nøyaktig lik ønsket verdi.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-21. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 5-6 stenges (sammenstilling 11). Diagrammet er produsert i Matlab.

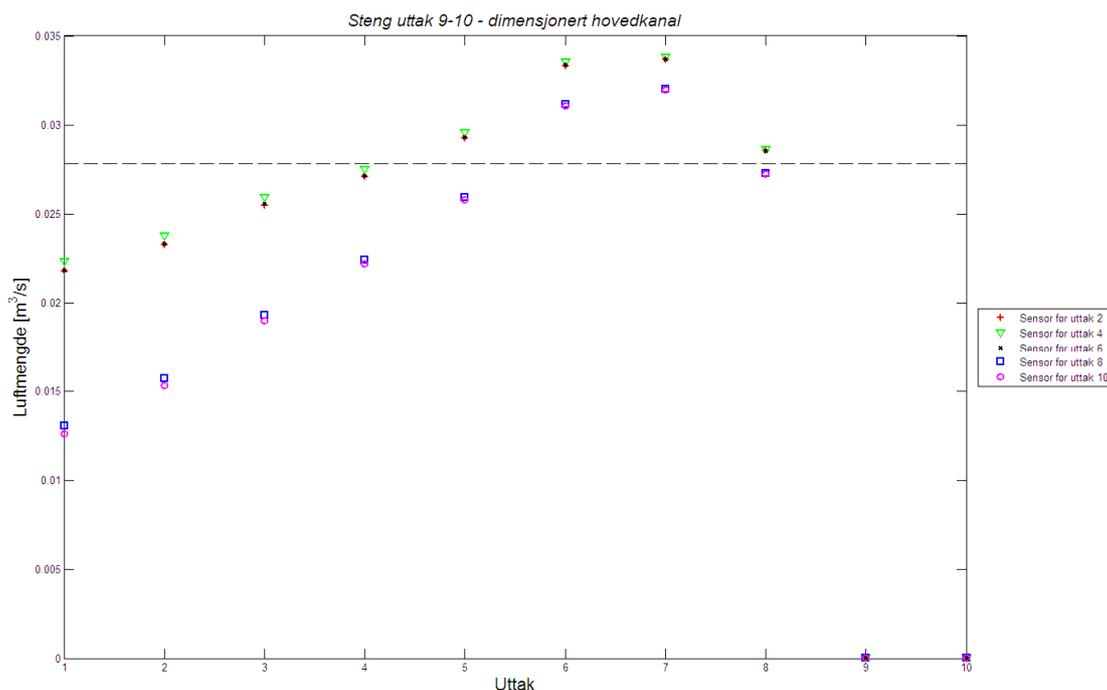
Sammenstilling 11

- Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

Uttak 5 og 6 stenges i sammenstilling 11. Luftmengdene i de ulike uttakene er like når hovedluftmengden blir regulert etter sensorene plassert før uttak 2, 6, 8 og 10. Luftmengdene er noe lave i uttak 1-3, mens den er tilnærmet ønsket verdi i uttak 4. Videre er luftmengdene relativt høye i uttak 7-10 for de ovennevnte sensorplasseringene. Luftmengdene som reguleres etter sensor før uttak 4 skiller seg ut i denne beregningen. Disse ligger generelt lavere enn de andre luftmengdene, og er vesentlig lavere i uttakene 1-4 spesielt. Som figuren viser er luftmengdene ved denne plasseringen nærmere ønsket verdi i uttak 7-10 i forhold til de andre sensorplasseringene.

Når det gjelder skjev luftmengdefordeling i de forskjellige uttakene, er dette igjen mest sannsynlig grunnet låste trykkfall over spjeld. Når det gjelder variasjon ved de ulike sensorplasseringene, skyldes dette at det ikke finnes noen matematisk løsning for sensorplassering S4 og S6, og beregninger for disse sensorplasseringene konvergerer ikke. De resterende sensorplasseringene (S2, S8 og S10) har løsninger, se vedlegg 13 for konvergeringstester.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-22. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 9-10 stenges (sammenstilling 12). Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 12

- Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer ikke

Luftmengdefordeling i denne sammenstillingen følger samme trend. Luftmengdene og fordelingen av disse er tilnærmet like, når hovedluftmengden regulert etter sensorene før uttak 2, 4 og 6. Luftmengdene er relativt lave i uttak 1-3, hvorav lavest i uttak 1 og stiger gradvis. I uttak 4 er luftmengdene bortimot lik ønsket verdi, mens de stiger godt over i uttak 5, 6 og 7. Det siste uttaket før de stengte uttakene (9 og 10) har en noe høyere luftmengde i forhold til ønsket verdi. Den samme trenden er tilfellet for luftmengdefordelingen hvor hovedluftmengden reguleres av sensorene før uttak 8 og 10. Forskjellen er at luftmengden i de forskjellige uttakene generelt sett ligger lavere enn de andre.

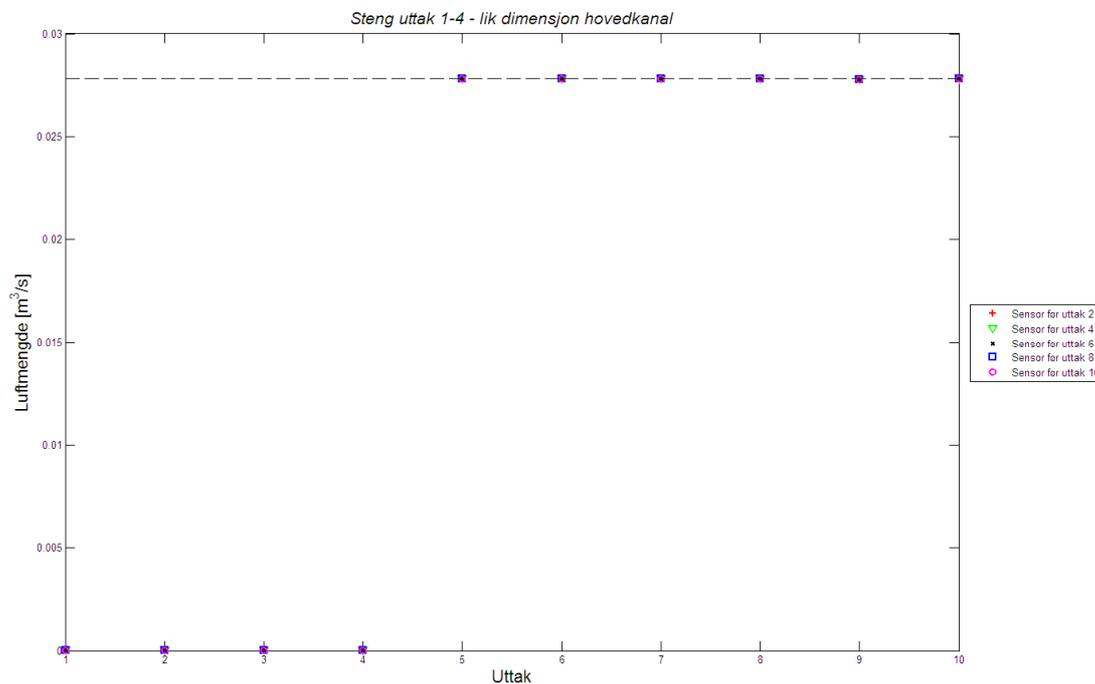
For denne sammenstillingen konvergerer ingen av beregningene, se vedlegg 13 for konvergeringstester.

Sammenstilling 13-16

I det påfølgende presenteres resultater hvor det har blitt stengt fire kanaluttak på forskjellige steder i kanalnettet. Dette ble gjort for å undersøke om det er noen sammenhenger eller ulikheter i forhold til antall stengte uttak, da det i resultatene over vises resultater for to stengte uttak. Beregningene ble utført på lik måte som ovenfor. I

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

de kommende beregningene ble det benyttet en nøyaktig regulering av hovedluftmengden på lik linje med sammenstilling 7-13.



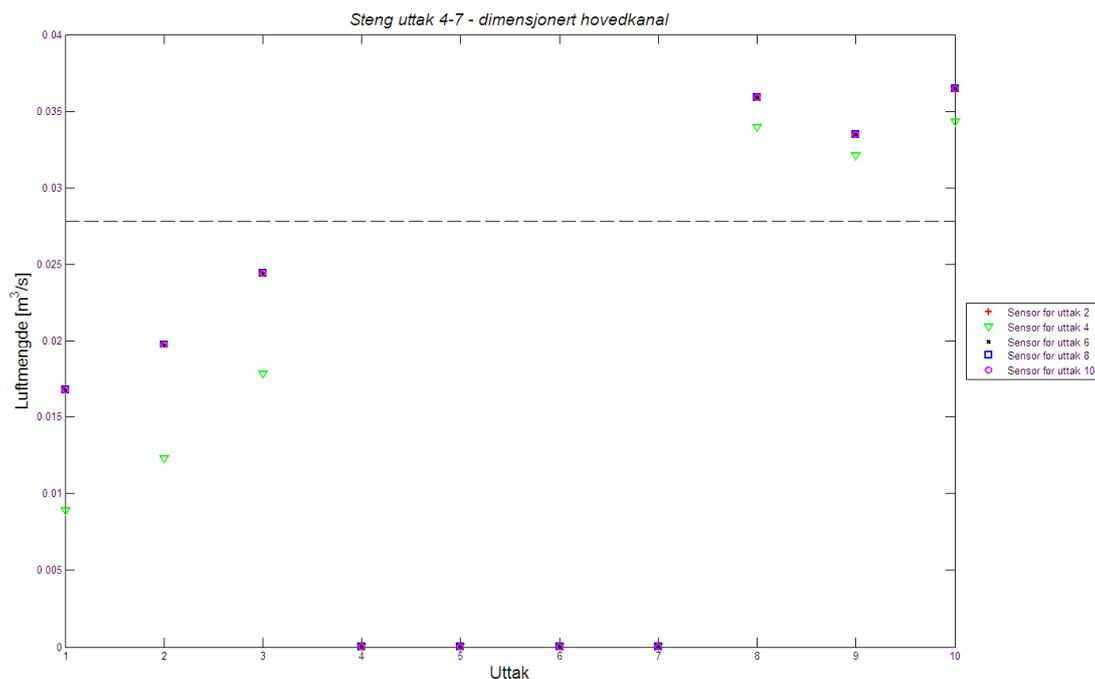
Figur 8-23. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 1-4 stenges (sammenstilling 13). Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 13

- Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

Som Figur 8-23 viser, er uttakene 1-4 stengt i dette tilfellet. På lik linje med sammenstilling 2, 4 og 8, er luftmengdene til de uttakene som ikke er stengt helt identiske. Sensorplassering vil i dette tilfellet vil dermed gi samme resultat uansett plassering. Samtlige beregninger konvergerer, så det er grunn til å anta at resultatene er holdbare.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-24. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plasseringer av trykksensorer når uttak 4-7 stenges (sammenstilling 14). Diagrammet er produsert i Matlab.

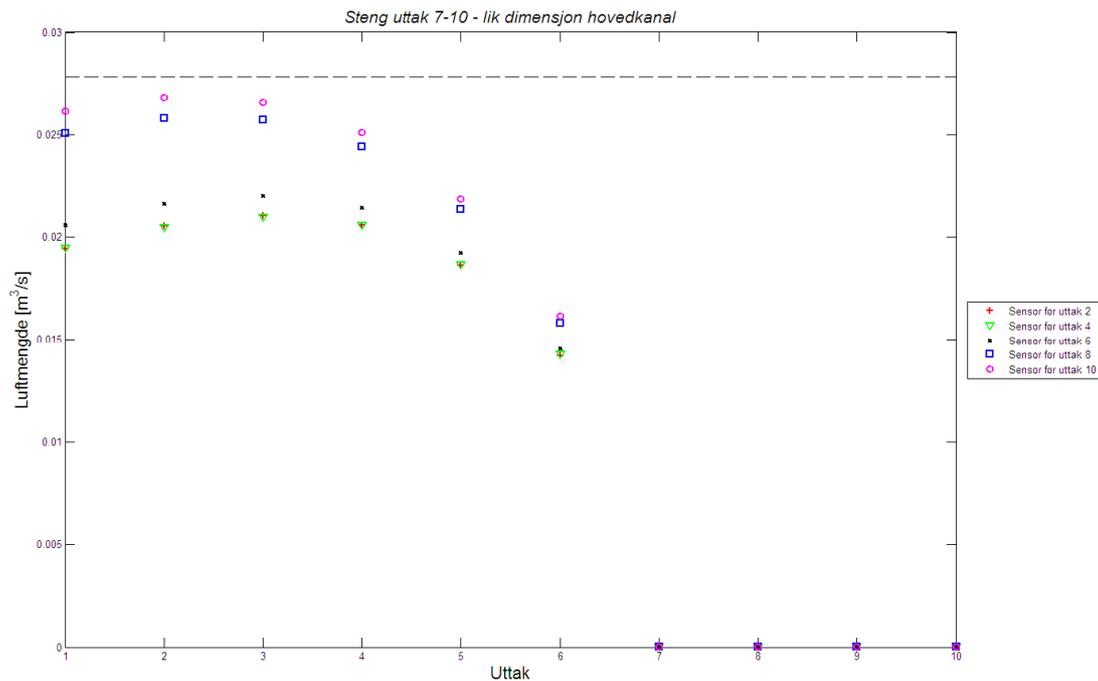
Sammenstilling 14

- Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

Som Figur 8-24 viser, er det stor likhet mellom sammenstilling 5 og 11 og denne. I dette tilfellet er luftmengdene lave i uttak 1-3 for samtlige sensorplasseringer, mens de er høye i uttak 8-10. Luftmengdene som blir regulert av sensor plassert før uttak 4 skiller seg ut. I uttakene 1-3 er luftmengdene for denne plasseringen av sensoren lengst fra ønsket luftmengde, mens de er nærmest i uttak 8-10. Luftmengdefordelingen for de andre sensorplasseringene opptrer identisk. De stiger tilnærmet lineært fra en meget lav luftmengde i uttak 1, til en luftmengde på rundt 0,025 m³/s i uttak 3. Videre i uttak 8-10 ligger luftmengdene markant over ønsket luftmengde.

På lik linje med sammenstilling 11, konvergerer ikke beregningene hvor luftmengdene er regulert etter sensorplassering S4 og S6. Det gjør de derimot for de andre sensorplasseringene. Skjevfordelingen i dette tilfellet er betydelig større ved denne sammenstillingen. Dette er trolig på grunn av de låste trykkfallene over spjeldene, som i dette tilfellet får en enda større betydning, ved en nokså lav hovedluftmengde.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-25. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plassering av trykksensor når uttak 7-10 stenges (sammenstilling 15). Diagrammet er produsert i Matlab.

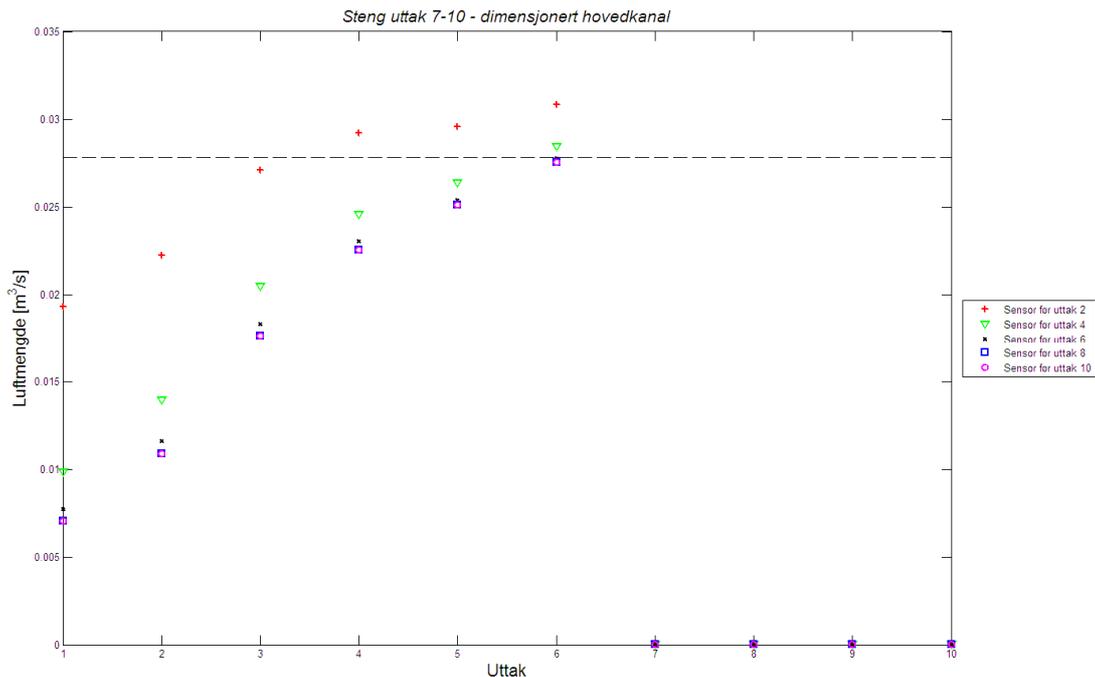
Sammenstilling 15.

- Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer ikke
- Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer
- Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer

I sammensetning 15 stenges uttak 7-10. Samtlige kanaluttak får for lite luft, noe Figur 8-25 viser. Det er i dette tilfellet kanaluttakene som er nærmest de som stenges som får lavest luftmengde. Den generelle trenden er lik for hver sensorplassering, hvor det er en økning i luft fra uttak 1 til uttak 2, videre synker luftmengden markant utover i kanalnett. I dette tilfellet har uttakene hvor hovedluftmengden blir regulert av sensor før uttak 10 mest luft. Sensorplassering før uttak 2 og 4 resulterer i lavest luftmengder i de forskjellige uttakene.

I samsvar med sammenstilling 3 og 9 hvor to uttak stenges, er det i dette tilfellet en lik trend. I denne sammenstillingen er luftmengdefordelingen i hvert av uttakene generelt lave, men spesielt lav hvor hovedluftmengden har blitt regulert av sensor før uttak 6. S2 og S4 konvergerer ikke, og det vil dermed ikke være noen matematisk løsning for disse plasseringene i dette tilfellet.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-26. Diagrammet viser luftmengdefordelingen for de forskjellige kanaluttakene ved ulike plasseringer av trykksensor når uttak 1-4 stenges (sammenstilling 16). Diagrammet er produsert i Matlab.

Sammenstilling 16

Sensor før uttak 2: beregningen konvergerer ikke
Sensor før uttak 4: beregningen konvergerer ikke
Sensor før uttak 6: beregningen konvergerer ikke
Sensor før uttak 8: beregningen konvergerer ikke
Sensor før uttak 10: beregningen konvergerer ikke

Figur 8-26 viser luftmengdefordelingen for et kanalnett med dimensjonert hovedkanal, hvor de fire siste uttakene er stengt. Luftmengdefordelingen viser samme trend som i sammenstilling 12, hvor luftmengdene i de første uttakene er meget lave og stiger utover i uttakene. Det er sensoren som er plassert før uttak 2 som resulterer i den beste luftmengdefordelingen i forhold til ønsket. Sensorene plassert før uttak 8 og 10 gir lavest luftmengde i samtlige uttak, men luftmengden i uttak 6 blir til gjengjeld tilnærmet lik ønsket luftmengde.

På lik linje med sammenstilling 6 og 12 finnes det ingen matematiske løsninger for denne sammenstillingen. Ingen av beregningene konvergerer, og luftmengdefordelingen i de forskjellige uttakene er meget dårlige og sannsynligvis ikke troverdige som en konsekvens av dette.

8.4 Beregning av luftmengdefordeling og nødvendig trykkfall over VAV-spjeld - Spjeldautoritet

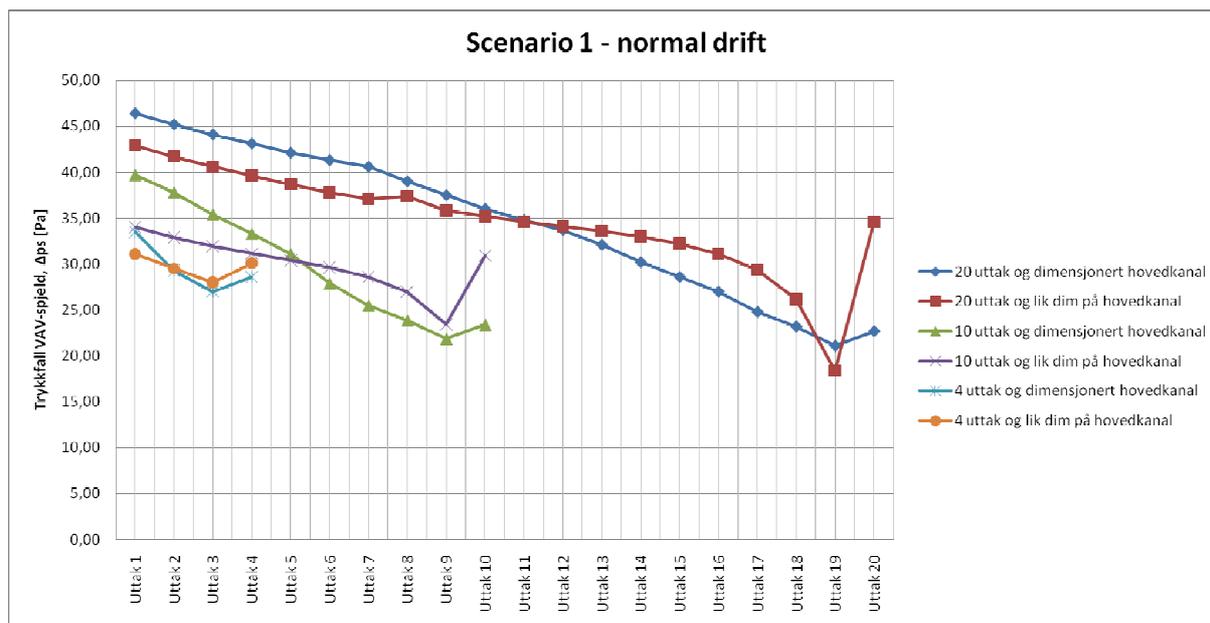
Som beskrevet i kapittel 7.3.2 om innregulering som en nødvendighet for å oppnå ønsket luftmengdefordeling, er det som kjent justering av spjeldene som endrer luftmengden ut i hvert enkelt uttak. For å sikre korrekte luftmengder er det essensielt at spjeldene opererer under gode driftsforhold, som blant annet innebærer tilstrekkelig trykkfall. Trykkuavhengige VAV-spjeld er en sannhet med modifikasjoner. Selv om spjeldene regulerer stabilt under de fleste trykkforhold, er det påpekt fra produsentene at de krever et trykkfall på minimum 20 Pa for å fungere optimalt (Swegon AB). I forbindelse med krav til SFP-faktor og energieffektive anlegg er det samtidig et ønske om å dimensjonere kanalnett slik at det blir et lavest mulig trykkfall for viften å overkomme. I dette tilfellet blir det utfordring med tanke på å oppfylle både de strenge kravene til energieffektivisering og kravene for god regulering.

Det ble utført beregninger for ulike kanaldesign og scenarioer for å undersøke hvilke trykkfall som måtte legges over VAV-spjeldene i uttakene ved innregulering av normale driftsforhold, slik at trykkfallene ikke havnet under 20 Pa når forskjellige rom strupes og stenges. Deretter ble det utført beregninger for ulike scenarioer for å undersøke nødvendig trykkfall over spjeld slik at perfekt luftmengdefordeling ble oppnådd. Det ble med dette forsøkt å finne ut om det var spjeld som fikk for lave trykkfall når ulike uttak ble stengt. En populær betegnelse for trykkfall over spjeld i forhold til trykkfall i kanalnett, er spjeldautoritet. Spjeldautoritet forteller hvor mye trykkfall det er over spjeldet i forhold til trykkfall i kanalsystemet. Med en høy spjeldautoritet vil det være mulig med en god og stabil regulering, dette er viktig for robustheten til anlegget.

8.4.1 Resultater og diskusjon

Beregningene ble utført i Matlab og hadde som formål å beregne nødvendig trykkfall over hvert enkelt spjeld for å oppnå ønsket luftmengdefordeling. Figur 8-27 viser beregnet nødvendig trykkfall for utbalansering av de ulike kanalnettene ved normal drift.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-27. Figuren viser nødvendig trykkfall over spjeld for å oppnå ønsket luftmengdefordeling, ved ulike kanaldesign og normale driftsforhold (Scenario 1). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

For både å overholde kravet på minimum 20 Pa i trykkfall over VAV-spjeldet og ønsket om et energieffektivt kanalnett, ble beregningen kjørt slik at spjeldet i ugunstigste krets fikk et trykkfall på rundt 20 Pa. I dette tilfellet ble ugunstigste krets beregnet til å være nest siste uttak for alle de tre ulike kanalnettene (4, 10 og 20 uttak). Figur 8-27 viser også at trykkfallet over VAV-spjeldene synker utover i kanalnettene for alle kanaldesign. Luften vil alltid søke veien med minst strømningsmotstand, som i dette tilfellet er de første uttakene. For at korrekt luftmengde skal oppnås i siste delen av kanalnettene, må det derfor legges et høyere trykkfall over spjeldene i starten. Verdiene forstås å være fornuftige og har god troverdighet.

For alle tre typer kanalnett (4, 10 og 20 uttak) viser figuren over at trykkfallet over VAV-spjeld er høyere for den første halvdel i dimensjonerte kanalnett, enn det er for lik dimensjon, mens det er lavere for siste halvdel (bortsett fra uttak 19). Sannsynligvis kan dette forklares ved at spjeldene i siste halvdel har mindre behov for struping av spjeld da det ligger større trykkfall i selve kanalnettene, og at spjeldene i første halvdel må kompensere for dette for å utbalansere anleggets luftmengdefordeling.

For kanaldesign med lik dimensjon på hovedkanalen får trykkfallet over VAV-spjeldet i siste uttak en ganske kraftig økning (rød kurve). Dette er trolig et resultat av hvordan kontinuitetsprinsippet er implementert som bakgrunn for beregning av luftmengde og trykk i siste uttak, og er gjenstand for diskusjon senere i rapporten. For kanalnett med dimensjonert hovedkanal har også siste uttak et høyere trykkfall over spjeldet (mørkeblå kurve), men kun en svak økning. Kontinuitetsprinsippet gjelder også for denne beregningen, men konsekvensen er tydelig ikke av like stor karakter. Dette skyldes trolig de ulike trykkforholdene på bakgrunn av at hovedkanalen er dimensjonert for å opprettholde en hastighet mellom 3-5 m/s. Lik dimensjon vil inneha svært lave hastigheter og dermed meget lave dynamiske trykk, mens det for dimensjonert hovedkanal vil være større hastigheter og dermed større trykkfall i kanalnettene. Dette krever mindre trykkfall over spjeldet.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Som figuren over viser, er det for kanalnett med 20 uttak behov for et høyere trykkfall over VAV-spjeldet i ugunstigste krets ved en dimensjonert hovedkanal (21,1 Pa) enn når hovedkanalen har lik dimensjon hele veien (18,4 Pa). Kombinert med høyere trykkfall i hovedkanalen grunnet høyere hastigheter når dimensjonene trappes ned, fører dette til et mindre energieffektivt anlegg uten at spjeldautoriteten blir noe bedre. Trykkfallet over spjeldet er høyere, men det er også trykkfallet i kanalnettet, slik at spjeldautoriteten heller ikke blir noe bedre.

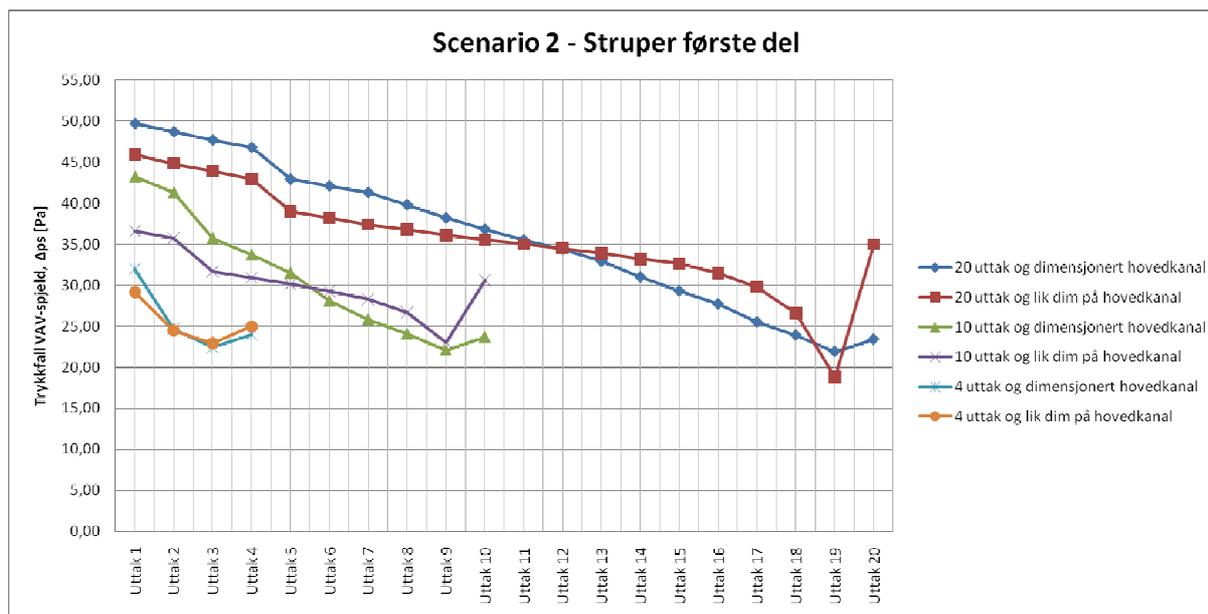
For kanalnett med fire og ti uttak er resultatet motsatt. I disse tilfellene er det VAV-spjeldene i tilfellene med lik dimensjon på hovedkanalen som krever størst trykkfall over det ugunstigste uttaket. Da trykkfallet i hovedkanalen er lavt grunnet kraftig avtagende lufthastigheter utover i kanalnett, blir det fortsatt den mest energieffektive designen. I dette tilfellet blir også spjeldautoriteten bedre. Resultatene indikerer at lik dimensjon på hovedkanal er fordelaktig for energieffektivitet og spjeldautoritet.

Når første delen av kanalnettet strupes til minimumsluftmengde (50 m³/h per uttak) endres luftmengde- og trykkforholdene i kanalnettet og nye beregninger for nødvendig trykkfall over VAV-spjeld ble utført. Beregningene simulerer dermed trykkuavhengige VAV-spjeld som justerer seg selv ettersom trykkforholdene varierer. Med første del menes uttak 1 for kanalnett med fire uttak, uttak 1 og 2 for kanalnett med ti uttak, samt uttak 1-4 for kanalnett for 20 uttak.

Trykkfallet over VAV-spjeldene i de første uttakene blir nå høyere for å kompensere for det faktum at kun halvparten av den opprinnelige luftmengden nå skal ut i disse uttakene. Resultatet for trykkfallene over VAV-spjeldene i de uttakene som ikke har reduserte luftmengder er omtrent det samme som for normale driftsforhold, og varierer mellom en reduksjon på 1 % og en økning på 4 %, se Figur 8-28. Dette gjelder for kanalnett med 10 og 20 uttak.

For kanalnettet med fire uttak reduseres trykkfallet over samtlige spjeld, men kun med 5-7 % for uttaket som strupes, mot 19-22 % for de tre andre VAV-spjeldene. I utgangspunktet kunne en forklaringen på dette vært at et slikt scenario får større konsekvenser for små anlegg, men på den annen side er det en noenlunde lik prosentvis størrelse av kanalnettet som strupes i forhold til de to andre kanalnettene. Dette var også poenget for hvorfor det stenges ett uttak for kanalnett med fire uttak, og henholdsvis to og fire for kanalnett med 10 og 20 uttak.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



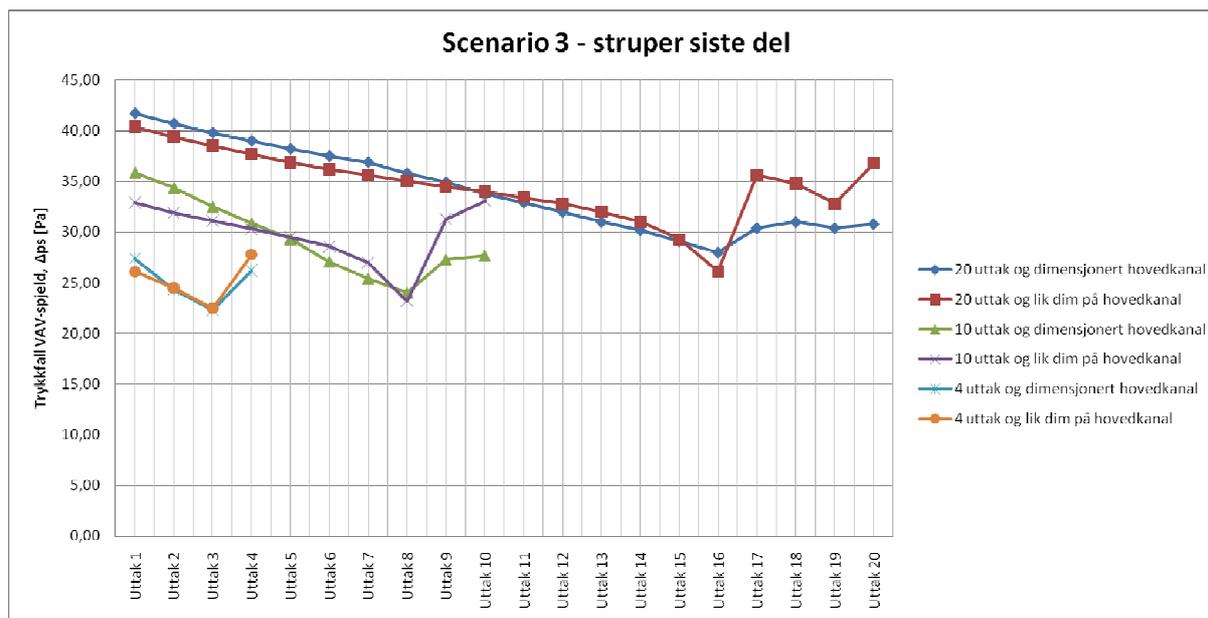
Figur 8-28. Figuren viser nødvendig trykkfall over spjeld for å oppnå ønsket luftmengdefordeling, ved ulike kanaldesign og struping av første del (Scenario 2). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Trykkfallet over VAV-spjeldet i ugunstigste krets økte med henholdsvis 0,8 (dimensjonert hovedkanal) og 0,4 Pa (lik dimensjon på hovedkanal) for kanalnett med 20 uttak. Resultatet for sistnevnte kanalnett er positivt med tanke på at spjeldautoriteten ikke ble svekket, samt at anlegget stadig er energieffektivt. For kanalnett med ti uttak ble endringen meget liten, mens VAV-spjeldene for kanalnett med fire uttak fikk en reduksjon på henholdsvis 4,6 (dimensjonert hovedkanal) og 5,1 Pa (lik dimensjon på hovedkanal). Dette tilsvarer en reduksjon på rundt 20 %.

Resultatene kan tolkes dit hen at det er viktig å legge trykkfall over spjeld en del høyere enn minstekravet i kanalnett med fire uttak, da dette trykkfallet reduseres betraktelig ved endringer i luftmengder (20 %). For kanalnett med 10 og 20 uttak, vil ikke trykkfall over spjeld i ugunstigste krets reduseres nevneverdig. En annen konsekvens av et slikt resultat, er at luftmengdefordelingen hadde blitt veldig skjev i kanalnett med fire uttak, hvis det ikke ble tatt høyde for justering av VAV-spjeld for å tilpasse nye trykkforhold. Det finnes VAV-spjeld på markedet som kun reguleres ut fra signaler fra endring i det rommet den regulerer. Slike spjeld vil ikke være fordelaktige i scenarioer som her diskuteres. Luftmengdene ville i så måte blitt for lave grunnet et for høyt trykkfall over VAV-spjeldet.

Hvis de siste uttakene strupes, blir situasjonen annerledes, noe Figur 8-29 viser.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-29. Figuren viser nødvendig trykkfall over spjeld for å oppnå ønsket luftmengdefordeling, ved ulike kanaldesign og struping av siste del (Scenario 3). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Ved struping av kanalnettets siste del (reduksjon fra 100 til 50 m³/h per uttak), stiger trykkfallet over VAV-spjeldene i de aktuelle uttakene slik at luftmengden reduseres. Som en konsekvens av dette økte trykkfallet over spjeldene i de siste uttakene, er det nå et mindre behov for struping i den første delen av kanalnettets i forhold til normal drift. For samtlige kanaldesign reduseres trykkfallet i de uttakene som ikke strupes (med et par unntak), hvor den prosentvise reduksjonen varierer mellom type kanalnett, se Tabell 8-2.

Endringen er mye større for kanalnettene med dimensjonert hovedkanal, et resultat gjeldende uansett antall uttak på kanalnettets, og hvor kanalnettet med fire uttak har den største reduksjonen. Tabell 8-2 viser en oversikt over trykkfallsendringen i hvert uttak, for de ulike kanalnettene. I tilfeller hvor det er installert trykkavhengige VAV-spjeld som ikke regulerer etter endrede trykknivå i kanalnettets, ville det oppstått en skjevfordeling av luftmengdene, med for lite luft i de første uttakene og for mye luft i de siste.

Når det gjelder VAV-spjeldet som nå har minst trykkfall, uttak 16 for kanalnettets med 20 uttak, har trykkfallet blitt redusert med 19 % når det er snakk om lik dimensjon på hovedkanalen. Med dimensjonert hovedkanal har det økt med 4 %. Tabell 8-2 viser også at samme trend gjelder for kanalnettet med 10 uttak, hvor trykkfallet er redusert med 16 % med lik dimensjon og er uendret for dimensjonert kanalnett. For kanalnettets med fire uttak derimot, er reduksjonen omtrent lik for begge typer hovedkanalutforming.

Det registreres også at endring i trykkfall over spjeld er noenlunde lik for alle uttakene som ikke stenges, når det er snakk om kanalnett med lik dimensjon. Dette er også trolig en konsekvens av lave trykkfall i hovedkanalen, slik at nødvendig trykkfallsendring opptrer jevnt i kanalnettets. Det kan tolkes dit hen at man i tilfeller med VAV-spjeld som ikke justerer spjeldposisjon likevel vil kunne få en god luftmengdefordeling, dog med noe mindre luftmengder enn ønsket.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

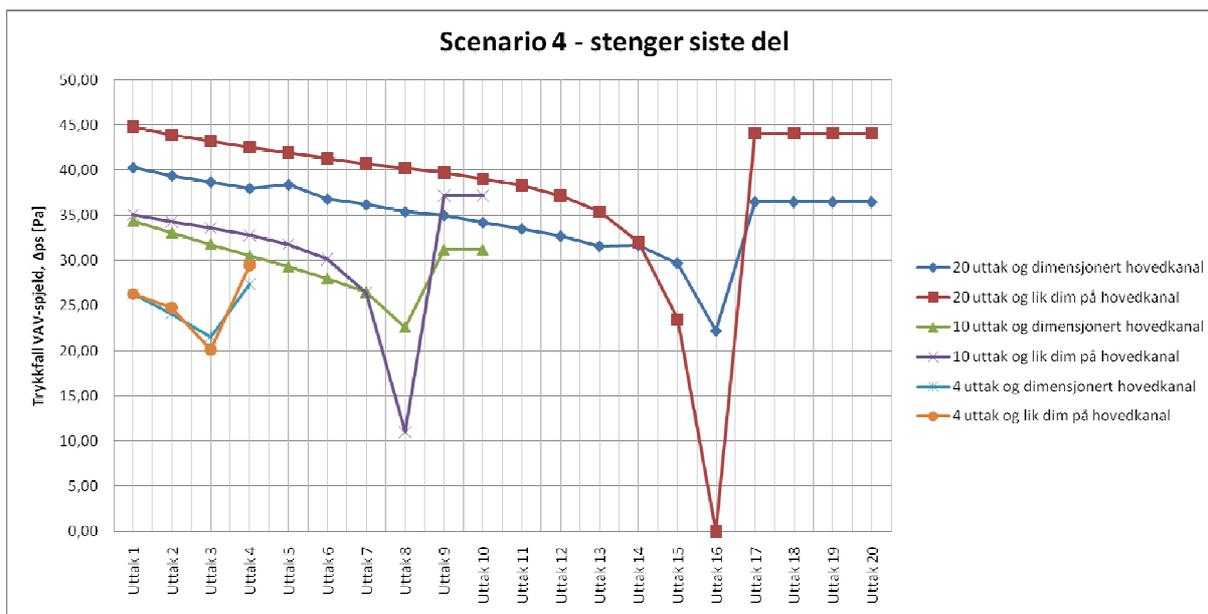
Tabell 8-2. Tabellen viser avviket for trykkfall over VAV-spjeld mellom scenario 1 og 3. Tabellen er produsert i Microsoft Excel.

Scenario 1 vs. 3	Avvik trykkfall VAV-spjeld, Δp , [Pa]					
	20 uttak og dimensjonert hovedkanal	20 uttak og lik dim på hovedkanal	10 uttak og dimensjonert hovedkanal	10 uttak og lik dim på hovedkanal	4 uttak og dimensjonert hovedkanal	4 uttak og lik dim på hovedkanal
Uttak 1	-11 %	-6 %	-11 %	-3 %	-22 %	-19 %
Uttak 2	-11 %	-6 %	-10 %	-3 %	-21 %	-20 %
Uttak 3	-11 %	-5 %	-9 %	-3 %	-21 %	-24 %
Uttak 4	-11 %	-5 %	-8 %	-3 %	-9 %	-8 %
Uttak 5	-10 %	-5 %	-6 %	-3 %		
Uttak 6	-10 %	-4 %	-3 %	-4 %		
Uttak 7	-10 %	-4 %	0 %	-6 %		
Uttak 8	-9 %	-7 %	0 %	-16 %		
Uttak 9	-7 %	-4 %	20 %	25 %		
Uttak 10	-7 %	-4 %	16 %	7 %		
Uttak 11	-6 %	-4 %				
Uttak 12	-5 %	-4 %				
Uttak 13	-4 %	-5 %				
Uttak 14	0 %	-6 %				
Uttak 15	2 %	-10 %				
Uttak 16	4 %	-19 %				
Uttak 17	18 %	17 %				
Uttak 18	25 %	25 %				
Uttak 19	31 %	44 %				
Uttak 20	26 %	6 %				

Tabellen viser også interessante resultater for trykkfall over VAV-spjeldene for uttakene som strupes. Trykkfallet i nest siste uttak (uttak 9 og 18) øker mer for kanalnett med lik dimensjon på hovedkanalen. Dette kan forklares ved at det i et dimensjonert kanalnett er en del trykkfall i hovedkanalen, grunnet høyere hastigheter. Med en slik utforming er det ikke nødvendig med like stort trykkfall over spjeldet i forhold til en hovedkanal med lik dimensjon og dermed minimalt med trykkfall i kanalen.

Det siste scenarioet som presenteres i rapporten for disse beregningene, er scenario 4. Ytterligere resultater fra andre scenarioer vises i vedlegg 17. For scenario 4 stenges siste del av kanalnettet, og resultatene vises på Figur 8-30.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-30. Figuren viser nødvendig trykkfall over spjeld for å oppnå ønsket luftmengdefordeling, ved ulike kanaldesign og stenging av siste del (Scenario 4). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Beregninger av trykkfall over VAV-spjeld viser at spjeldet for uttaket før de som stenges vil få for lave verdier med tanke på reguleringsnøyaktighet og kravet om minimum 20 Pa trykkfall. Dette gjelder i tilfellet hvor hovedkanaler har lik dimensjon og 10 eller 20 uttak. Beregningene viser at spjeldet i uttak 16 med lik dimensjon får trykkfall på 0 Pa. Dette spjeldet vil ikke være i stand til å vise korrekte luftmengder, ei heller regulere nøyaktig. Det vil si at ytterligere endringer i kanalnett etter at uttak 17-20 er stengt sannsynligvis ikke vil fanges opp av VAV-spjeldet i uttak 16. Når uttak 17-20 åpnes igjen, vil trykkfallet øke tilbake til opprinnelig nivå, og spjeldet vil trolig gjenvinne sin autoritet.

Resultatene fra dette scenarioet er også satt opp i tabell, for å se på den prosentvise endringen i trykkfall over VAV-spjeld, se Tabell 8-3. Tabellen viser at trykkfallet synker i kanalnett med dimensjonert hovedkanal, og øker for lik dimensjon. En stenging av de fire siste uttakene var ventet å resultere i noenlunde tilsvarende trend når det gjaldt endringer i trykkfall over spjeld. Faktumet er motsatt for hovedkanal med lik dimensjon med 10 og 20 uttak. Forklaringen ligger trolig i at de andre spjeldene må kompensere for den kraftige reduksjonen i uttak 8 og 16.

Grunnen til at kanalnett med lik dimensjon reduseres såpass mye mer enn for dimensjonerte kanalnett i disse to uttakene, relateres til at det ikke ble en 100 % korrekt luftmengdefordeling i beregningene, som eneste scenario. Luftmengden i uttak 16 ble noe mindre, og spjeldet forsøker å kompensere for dette ved å åpne helt (null trykkfall) for å oppnå ønsket luftmengde.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Tabell 8-3. Tabellen viser avviket for trykkfall over VAV-spjeld mellom scenario 1 og 4. Tabellen er produsert i Microsoft Excel

Scenario 1 vs. 4	Avvik trykkfall VAV-spjeld, Δp_s [Pa]					
	20 uttak og dimensjonert hovedkanal	20 uttak og lik dim på hovedkanal	10 uttak og dimensjonert hovedkanal	10 uttak og lik dim på hovedkanal	4 uttak og dimensjonert hovedkanal	4 uttak og lik dim på hovedkanal
Uttak 1	-15 %	4 %	-15 %	3 %	-27 %	-18 %
Uttak 2	-15 %	5 %	-14 %	4 %	-22 %	-19 %
Uttak 3	-14 %	6 %	-11 %	5 %	-26 %	-39 %
Uttak 4	-13 %	7 %	-9 %	5 %	-4 %	-2 %
Uttak 5	-10 %	8 %	-6 %	4 %		
Uttak 6	-12 %	8 %	0 %	2 %		
Uttak 7	-12 %	9 %	4 %	-8 %		
Uttak 8	-10 %	7 %	-6 %	-145 %		
Uttak 9	-7 %	10 %	30 %	37 %		
Uttak 10	-5 %	10 %	25 %	17 %		
Uttak 11	-4 %	10 %				
Uttak 12	-3 %	8 %				
Uttak 13	-2 %	5 %				
Uttak 14	5 %	-3 %				
Uttak 15	4 %	-37 %				
Uttak 16	-22 %	-3109900 %				
Uttak 17	32 %	33 %				
Uttak 18	36 %	41 %				
Uttak 19	42 %	58 %				
Uttak 20	38 %	22 %				

8.5 Beregninger for variabelt statisk trykk

For beregningene i kapittelet over, ble det også registrert statisk trykk og totaltrykk for alle sensorplasseringer ved alle typer scenarioer. Disse resultatene viser i sin helhet både i tabellform og grafisk form i vedlegg 17.

Vedleggene viser hvilke statisk trykk som oppstår i de ulike sensorposisjonene hvis ventilasjonsanlegget ikke reguleres etter konstant statisk trykk, slik normal trykkregulering baserer seg på.

Grunnet begrenset tid, ble det ikke lagt vekt på å analysere resultatene nærmere, men vedlegger disse i rapporten, da det med stor sannsynlighet vil være meget interessante data for videre arbeid innenfor dette tema.

8.6 Validering av beregningsresultater

For å øke troverdigheten av resultatene fra beregningsverktøyet utviklet i Matlab, ble det valgt å utføre målinger av et fysisk kanalnett, for så å sammenligne resultatene mellom disse. Det viste seg vanskelig å oppnå resultater som kunne brukes til å sammenligne disse to metodene, da måleverdiene ikke var representative for normale forhold. Dette forklares nærmere under diskusjonskapittelet. Forsøket på valideringen bygger dog oppunder oppfatningen om at det ofte er stor forskjell mellom teori og praksis.

Det ble også vurdert validering opp mot MagiCAD (HVAC-tilleggsapplikasjon til AutoCAD), som de fleste rådgivende ingeniører i VVS i Norge benytter for å tegne og dimensjonere kanalnett. Da gruppen ikke hadde tilgang til matematikken bak dette programmet, ble denne sammenligningen ikke foretatt.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Dog er beregningene basert på velkjente og godt dokumenterte likninger for trykk- og luftmengdeforhold, og underveis i oppbyggingen ble det hele tiden foretatt manuelle kontrollberegninger. I for eksempel vedlegg 17, er det satt opp kontrollberegninger for statisk trykk, som sørger for å fange opp eventuelle beregnings- og avlesningsfeil.

8.7 Laboratoriemålinger av fysisk kanalnett

Som tidligere beskrevet, ble det utført en del målinger av både statisk trykk, luftmengder og vifteeffekt for et ventilasjonsanlegg som ble montert for dette formålet. Måten kanalnettet ble bygget opp, hvordan målingene ble utført, samt metode for databehandling er utførlig beskrevet i metodekapittelet. Det vil videre blir presentert resultater fra disse målingene. Målet med målingene var å undersøke optimal sensorplassering og luftmengdefordeling.

8.7.1 Ulike scenarier

Manuelle målinger og dataassisterte logger ble utført for flere ulike scenarier, for dermed å forsøke å avdekke ulike konsekvenser og eventuelle sammenhenger og avvik. Nedenfor vises en tabell med oversikt over hva de ulike scenarioene innebar i forhold til hvilke uttak og sensorplasseringer som var gjeldende, se Tabell 8-4. Det ble utført totalt 34 ulike målescenarier (Scenario 0-33), inkludert innregulert drift. Ytterligere forklaring rundt måleprosessen og fremgangsmåten for hvert scenario er ytterligere forklart under tabellen. Disse nummererte scenarioene er ikke å sammenligne med de nummererte scenarioene for beregning av spjeldautoritet.

Tabell 8-4. Tabellen viser en oversikt over de ulike scenarioene som ble gjennomført under målingene av kanalnettet.

Scenario	Uttak				Sensorplassering					Justering vifte	Etterjustering av spjeld	
	1	2	3	4	1	2	3	4	5			
0											Nei	Nei
1											Nei	Nei
2											Nei	Nei
3											Nei	Nei
4											Nei	Nei
5											Nei	Nei
6											Nei	Nei
7											Nei	Nei
8										x	Ja	Nei
9									x		Ja	Nei
10								x			Ja	Nei
11							x				Ja	Nei
12					x						Ja	Nei
13					x						Ja	Nei
14					x						Ja	Nei
15					x						Ja	Nei

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

16	■	■	■	■		x				Ja	Nei
17	■	■	■	■		x				Ja	Nei
18	■	■	■	■		x				Ja	Nei
19	■	■	■	■		x				Ja	Nei
20	■	■	■	■			x			Ja	Nei
21	■	■	■	■			x			Ja	Nei
22	■	■	■	■			x			Ja	Nei
23	■	■	■	■			x			Ja	Nei
24	■	■	■	■				x		Ja	Nei
25	■	■	■	■				x		Ja	Nei
26	■	■	■	■				x		Ja	Nei
27	■	■	■	■				x		Ja	Nei
28	■	■	■	■				x		Ja	Ja
29	■	■	■	■				x		Ja	Ja
30	■	■	■	■	x					Ja	Ja
31	■	■	■	■	x					Ja	Ja
32	■	■	■	■			x			Ja	Ja
33	■	■	■	■			x			Ja	Ja

■	=	Fullt åpent VAV-spjeld
■	=	Helt stengt VAV-spjeld
■	=	Strupet VAV-spjeld for halvering av luftmengde

Tabellen ovenfor gir en illustrativ oversikt over hvilke uttak og spjeld som ble justert og overvåket i de ulike scenarioene, men videre blir også prosedyren forklart nærmere:

Scenario 0: Representerer normal drift med innregulert anlegg.

Scenario 1-7: Logget først ett minutt under normal drift. Etter ett minutt ble spjeld i valgt uttak stengt 100 %. Luftmengdefordeling på de andre uttakene ble registrert. I dette tilfellet ble det simulert at viften ikke registrerte trykkendringer i kanalnettet og dermed ble ikke hovedluftmengden justerte, som da kun ble fordelt i de tre andre uttakene. Kontrollmålinger av statisk trykk i alle "manuelle" punkter, for å kontrollere dataloggede verdier.

Scenario 8-27: Logget først ett minutt under normal drift. Statisk trykk ved valgt "sensorplassering" ble registrert. Deretter ble spjeld i valgt uttak helt stengt etter ett minutt og trykkøkning registrert. Frekvens på frekvensomformer ble så redusert gradvis til statisk trykk ble likt det som var ved normal drift (før stenging av spjeld). Når viften ble regulert ned, fortsatte loggingen, mens luftmengdefordelingen ble målt. Disse forsøkene simulerer "VAV-spjeld" som ikke justerer spjeldposisjon selv om trykket i kanalnettet endres (trykkavhengige VAV-spjeld).

Scenario 28-33: Logget først ett minutt under normal drift. Statisk trykk ved valgt "sensorplassering" ble registrert. Valgt uttak ble redusert til minimum luftmengde (50 %). Frekvens til frekvensomformeren ble deretter justert i forbindelse med trykkendringer som oppsto. "VAV-spjeldet" i det aktuelle uttaket ble igjen justert (ny spjeldposisjon, trykkuavhengige VAV-spjeld), for å levere korrekt luftmengde i henhold

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

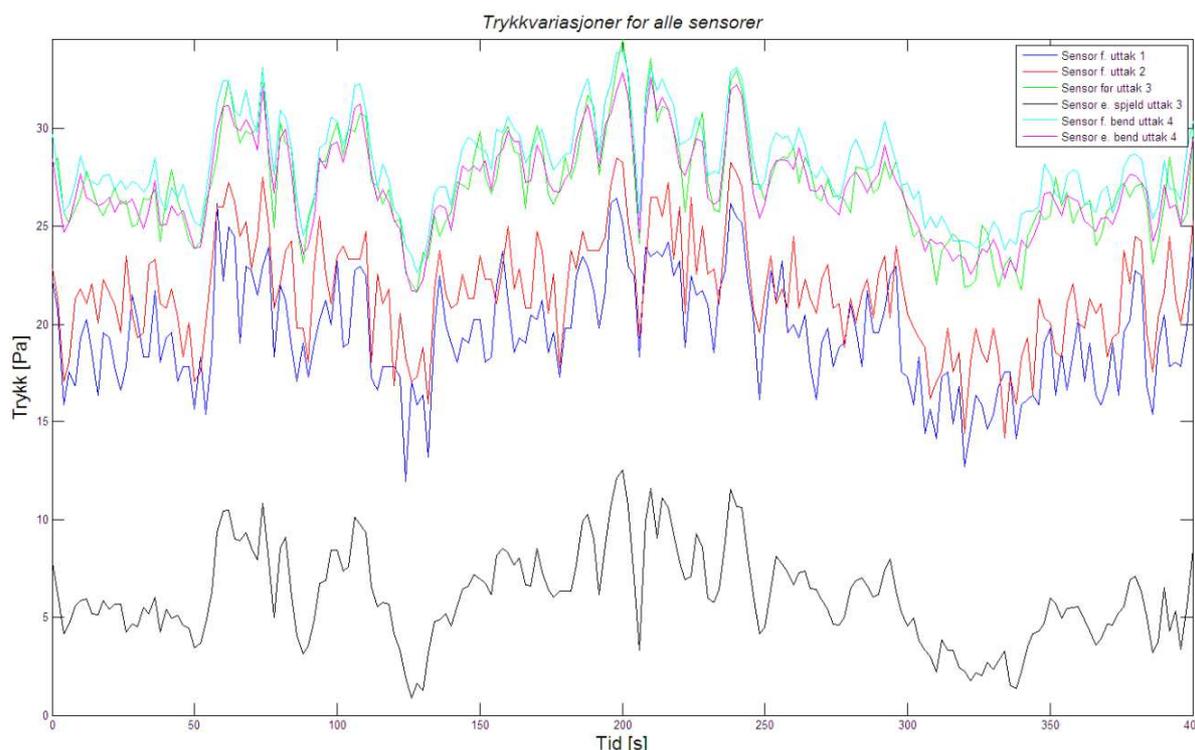
til nye trykkforhold i kanalnettet. Ny spjeldinnstilling fører til at frekvensomformerer ble justert gang nummer to. Etter dette ble luftmengdene i de andre uttakene registrert.

Det ble også gjennomført noen ensartede scenarioer på ulik tid for å se på eventuelle avvik på resultatene. Resultatene fra disse benyttes deretter som en dokumentasjon på gode og nøyaktige målinger, og bidrar til å øke troverdigheten av oppgaven.

8.7.2 Logging av statisk trykk

8.7.3 Resultater og diskusjon

For å avdekke eventuelle gode og dårlige plasseringer av statiske trykksensorer, og de konsekvensene de ulike plasseringene fører til i forhold til blant annet luftmengdefordeling, ble statisk trykk i seks ulike punkter i kanalnettet logget. Loggingen ble foretatt ved flere ulike scenarioer, for å se om de ulike plasseringene av statiske trykksensorer oppførte seg ulikt. Som et utgangspunkt ble det først logget statisk trykk under normale driftsforhold. Det vil si dimensjonerte luftmengder og innregulerte spjeldposisjoner. Figur 8-31 presenterer resultatene fra logging under normal drift.



Figur 8-31. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene i Pascal for de ulike sensorplasseringene, ved innregulerte spjeldposisjoner og normale driftsforhold (Scenario 0). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

For å kontrollere de loggede verdiene og deres validitet, ble det også utført manuelle kontrollmålinger for det samme området. Sammenligningen av disse verdiene viser at disse er samstemte, i den forstand at forholdene mellom verdiene for de ulike sensorene er like. Selve verdiene er ikke nøyaktig like, da målemetoden er annerledes i tillegg til at

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

målepunktet ikke er nøyaktig likt plassert, se metodekapittelet. Tabell 8-5 viser en oversikt over både målte og loggede statiske trykk for scenario 1.

Tabell 8-5. Tabellen viser sammenligning mellom manuell trykkmåling ved hjelp av pitotrør og dataassistert logging ved hjelp av trykktransducer.

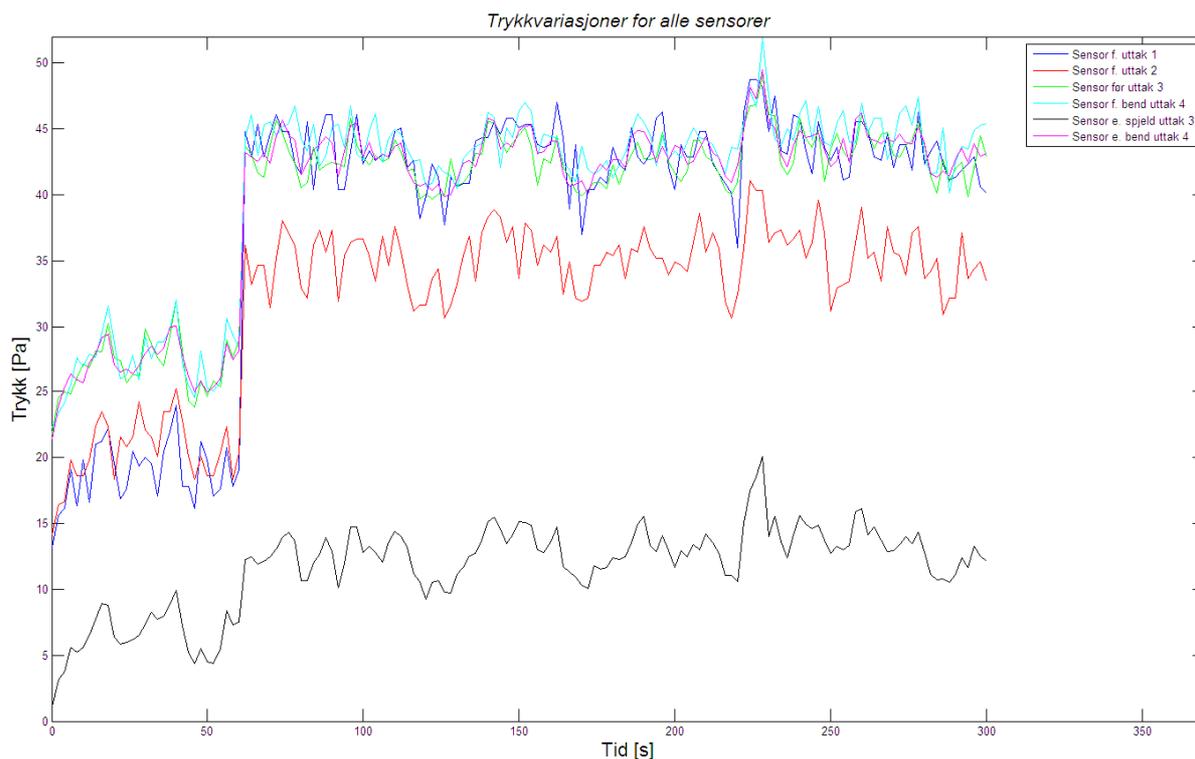
Sammenligning manuell måling og loggede verdier	Statisk trykk [Pa]	
	Manuell måling - pitotrør	Logging med trykktransducer
Før uttak 1	46,6	43,2
Før uttak 2	39,9	35,2
Før uttak 3	45,9	42,9
Før spjeld uttak 4	48,1	43,3

Som Figur 8-31 viser, er det betydelige forskjeller i de statiske trykkene i forhold til hvor det logges, og det er også store svingninger i de loggede verdiene. Svingningene opptrer dog ganske likt for de ulike sensorplasseringene, når grafene studeres visuelt, men altituden på svingningene varierer. For å kunne trekke konklusjoner og slutninger rundt disse trykksvingningene, er det foretatt beregninger rundt dette, slik at bakgrunnen for påstander er bedre begrunnet. Se 8.7.3.1 for beregning av dette.

Videre presenteres ikke resultater og grafer fra samtlige 34 scenarioer når det gjelder trykkforhold, men kun de som skilte seg ut i positiv eller negativ forstand, samt generelle betraktninger. Samtlige diagrammer og loggedata er dog vedlagt rapporten som vedlegg 19 og 20. Hvilken konsekvens dette har for luftmengdefordeling vises i kapittel 8.7.4 som presenterer resultatene fra luftmengdemålingene.

Som tidligere beskrevet ble det i scenario 1-7 stengt ett eller flere spjeld, uten at viftepådraget ble justert for å holde et konstant statisk trykk (trykkregulering). Dette skulle representere et VAV-case, hvor VAV-enheten på romnivå får signal fra romføleren om å justere spjeldposisjonen for å endre luftmengden inn i rommet, men hvor viften ikke registrerer de statiske trykkendringene som da oppstår i kanalnettet, og dermed ikke justerer hovedluftmengden. Dette vil i så måte simulere en defekt eller dårlig plassert trykksensor, som ikke klarer å videreformidle den lokale endringen (romnivå) til sentralt nivå (viften). Konsekvensen av dette er at den reduserte luftmengden i den ene uttaket kun blir omfordelt i de resterende uttakene.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

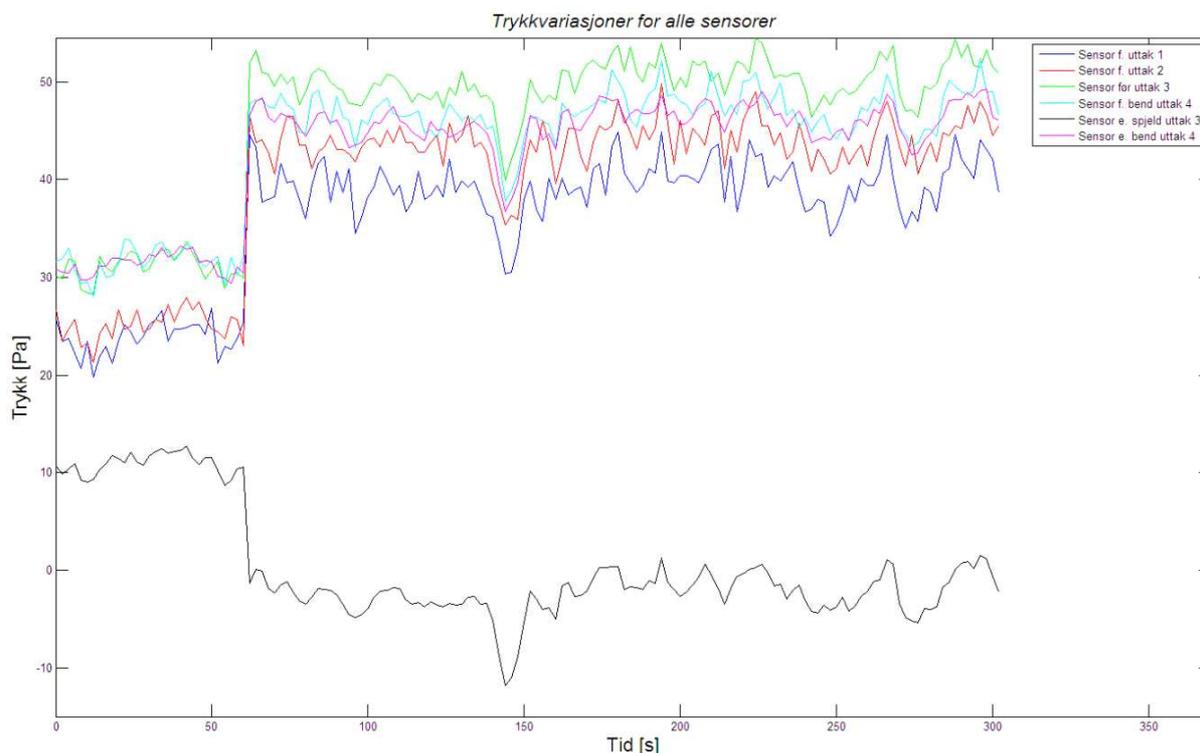


Figur 8-32. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 1 stenges etter 60 sekunder (Scenario 1). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

I scenario 1 stenges uttak 1 etter 60 sekunders drift, uten av hovedluftmengden blir redusert tilsvarende. Figur 8-32 presenterer resultatet for de statiske trykkvariasjonene, og viser at det statiske trykket øker for samtlige sensorplasseringer når spjeldene lukkes, og hvor økningen er størst for sensoren før uttak 1 (blå kurve). Ellers øker trykket noenlunde likt for de andre sensorplasseringene. I dette tilfellet øker altså det statiske trykket mest for sensoren som er plassert rett før uttaket som stenges. Trykket øker trolig grunnet høyere motstand i nettet som følge av at et spjeld lukkes og som følge av at omtrent tilsvarende luftmengde nå skal gjennom tre uttak i stedet for fire, noe som fører til høyere trykkfall i kanalnettet generelt og over enkeltmotstander spesielt.

Denne samme trenden ser også ut til å gjelde for de fleste andre scenarioer som innebar stenging av ett uttak uten etterjustering av vifte og luftmengder. Det vil si at de samme resultatene også vises for scenarioene hvor uttak 2 stenges (scenario 2) og uttak 3 stenges (scenario 3, se Figur 8-33). Det samme kan ikke sies om scenario 4 hvor uttak 4 stenges. I dette tilfellet ser det ut til at sensoren plassert før uttak 3 er noe mer responsiv til endringen i statisk trykk. For det samme scenarioet vises det også at sensoren plassert før uttak 2 registrerer en høyere økning enn for sensoren før uttak 1. Dette kan mulig forklares ved at totaltrykket øker mens den dynamiske delen holdes lik (samme lufthastighet), og at det statiske trykket dermed blir større for begge punkter, men enda litt større i punktet før uttak 2 enn uttak 1.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

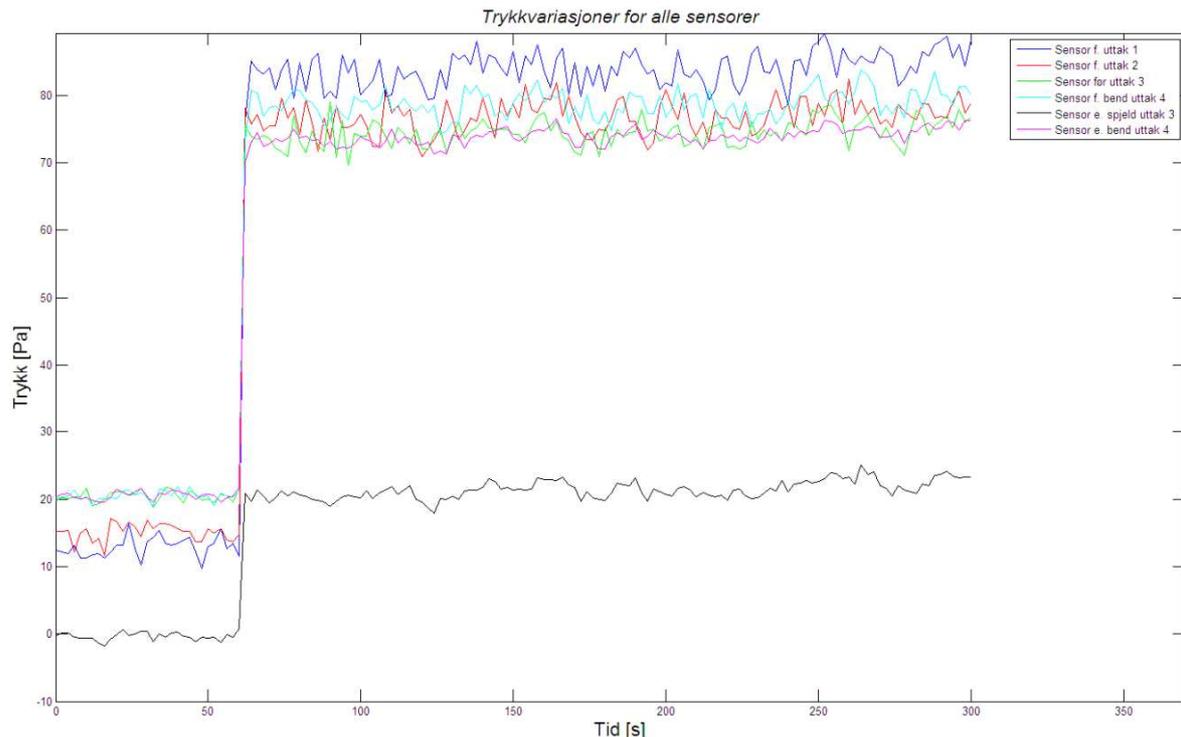


Figur 8-33. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 3 stenges etter 60 sekunder (Scenario 3). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

Det statiske trykket før uttak 3 økte mest når uttak 3 ble stengt, se Figur 8-33. I dette tilfellet var det dermed også størst økning for sensoren plassert rett før uttaket som ble stengt, på lik linje med det Figur 8-32 viste ved stenging av uttak 1. Figuren over viser også at det statiske trykket etter spjeldet i uttak tre falt til verdier rundt null når uttak 3 ble stengt. En fornuftig utvikling med tanke på at det da ikke strømmes noe luft gjennom det punktet sensoren er plassert, og det statiske trykket blir likt det omliggende atmosfæriske trykket. Verdien blir da i området null fordi de statiske trykkmålingene er basert på trykktransducere som måler differansen i forhold til et referansetrykk, i dette tilfellet atmosfærisk trykk. Verdiene ligger også ved flere tidspunkt under null, noe som kan forklares i forhold til kalibreringskurven som er foretatt ved andre atmosfæriske trykk enn tilfellet under denne loggingen.

I scenario 5-7 stenges to uttak om gangen uten av viften justeres, og de statiske trykkene øker betraktelig mer enn ved stenging av ett uttak, se Figur 8-34. Et naturlig resultat på bakgrunn av at det totale trykkfallet i kanalnettet øker når tilsvarende luftmengde skal finne veien gjennom halvparten så mange uttak og motstanden dermed øker. Lufthastigheten forblir lik, og dermed også det dynamiske trykkleddet ($0,5 \cdot \rho v^2$) som trekkes fra totaltrykket når det statiske trykket skal bestemmes. Et høyere totaltrykk og et konstant dynamisk ledd fører dermed til mye høyere statiske trykk i de aktuelle punktene.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

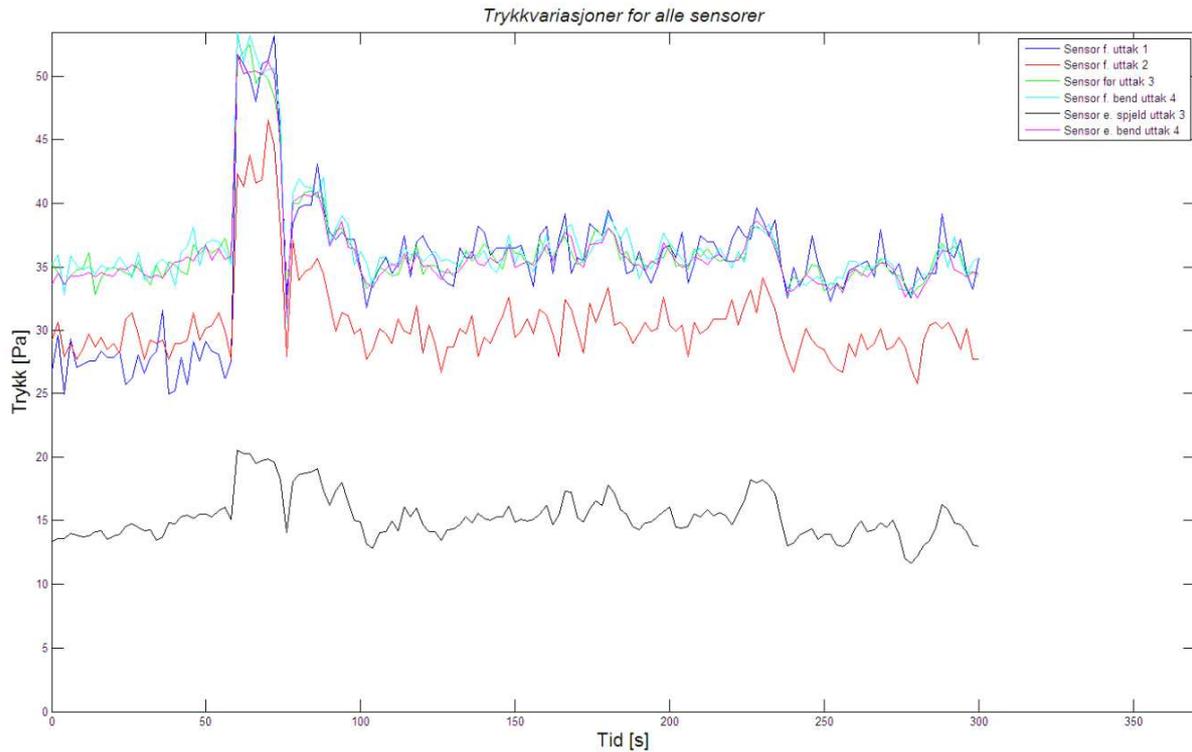


Figur 8-34. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 1 og 2 stenges etter 60 sekunder (Scenario 6). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

Som Figur 8-34 viser, er det nok en gang sensorene plassert rett før de stengte uttakene som reagerer mest på endringene og registrerer størst økning i statisk trykk. Figuren viser også at sensoren etter bend ved uttak 4 gir mye mer stabile verdier enn de andre sensorplasseringene etter stenging. Det vises også i de andre figurene at denne plasseringen er mer stabil, men ikke like stabil som den er i dette scenarioet, uvisst av hvilken grunn. Dette kan skyldes enda mer stabile trykkforhold når sensoren måler i et høyere trykkområde.

Fra scenario 8 og utover ble også ulike kombinasjoner av uttak stengt i likhet med scenario 1-7, men viften ble nå i tillegg justert slik at det statiske trykket for den valgte sensorplasseringen ble justert til opprinnelig verdi. Disse forsøkene simulerer "VAV-spjeld" som ikke fungerer som tiltenkt, dvs. at spjeldposisjon ikke endres selv om trykket i kanalnettet endres. Figur 8-35 viser at det statiske trykket øker etter 60 sekunder når spjeldet i uttak 1 stenges, men synker igjen til opprinnelig verdi 15 sekunder senere når viftepådraget reduseres for å holde statisk trykk likt det utgangspunktet var før stenging av spjeld. I dette tilfellet var det statisk trykk før bend ved uttak 4 som skulle holdes konstant (cyan linje), som viser verdier på ca. 35 Pa både før og etter stenging av uttak 1. Trykkene for de andre sensorplasseringene faller også tilbake til opprinnelig verdi, bortsett fra det statiske trykket før uttak 1 som ligger rundt 7 Pa høyere enn utgangspunktet. Dette er ikke ønskelig, men trolig en konsekvens av at det er uttaket rett etter denne sensoren som stenges (uttak 1). Figuren viser også at det er denne sensoren som reagerer mest på stengingen.

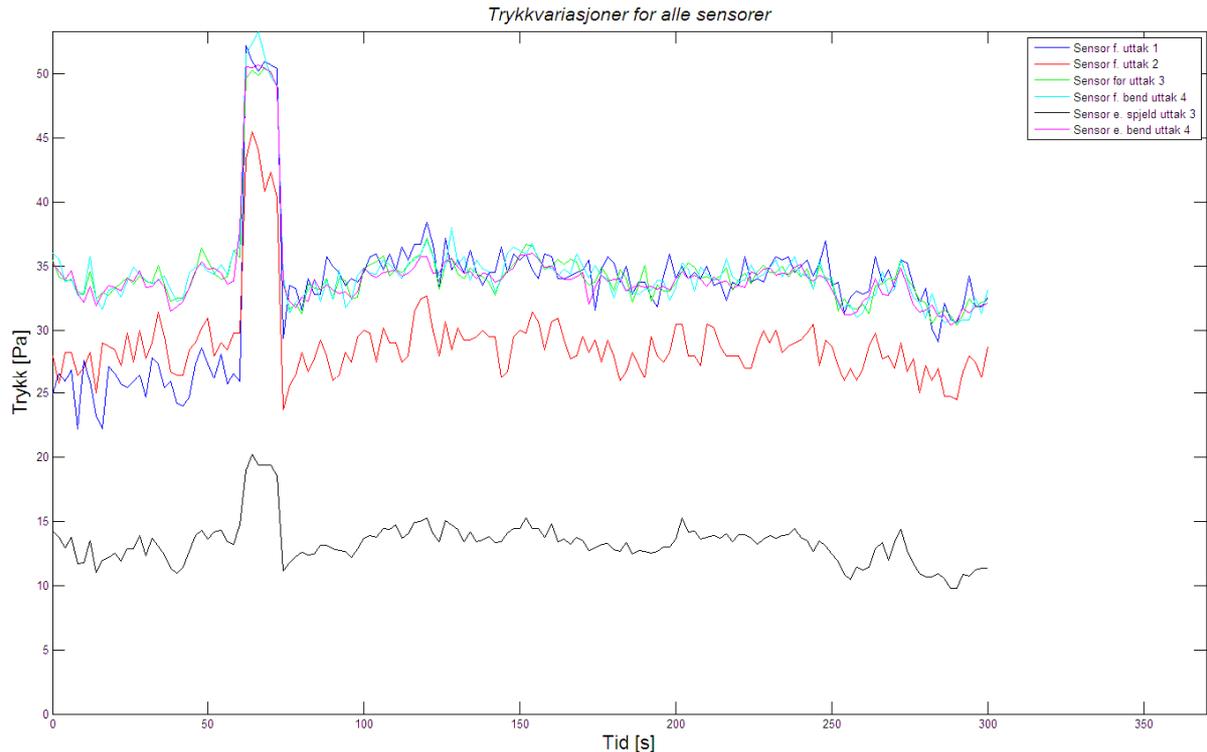
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-35. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 1 stenges etter 60 sekunder og viften styres etter sensorplassering før bend ved uttak 4 (Scenario 9). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

Den samme trenden for trykkforhold før og etter stenging og viftejustering er også gjeldende for scenario 10. I dette tilfellet stenges det samme uttaket (uttak 1), men sensoren er nå plassert før uttak 3, se Figur 8-36.

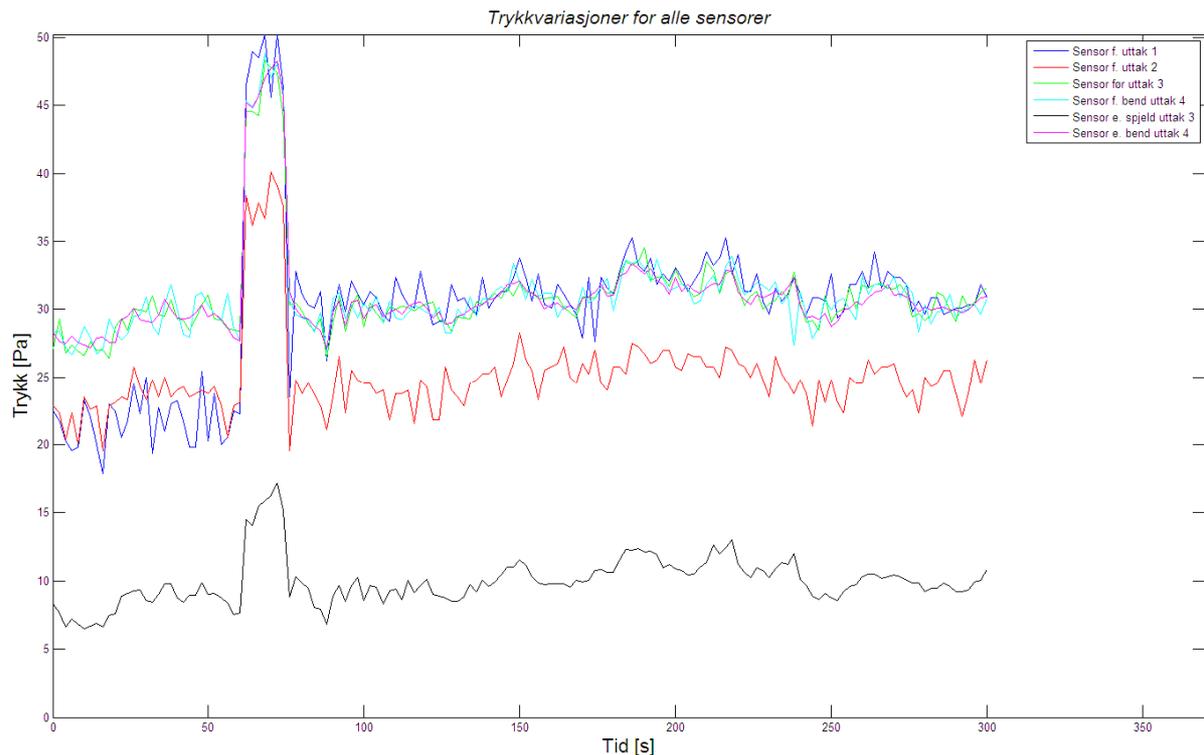
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-36. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 1 stenges etter 60 sekunder og viften styres etter sensorplassering før uttak 3 (Scenario 10). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

For scenarioer med stenging av uttak 1, men med sensorplasseringer i starten av kanalnettet, blir resultatene noe annerledes. Figur 8-37 og Figur 8-38 viser trykkforholdene når sensoren er plassert før uttak 2 (scenario 11) og før uttak 1 (scenario 12).

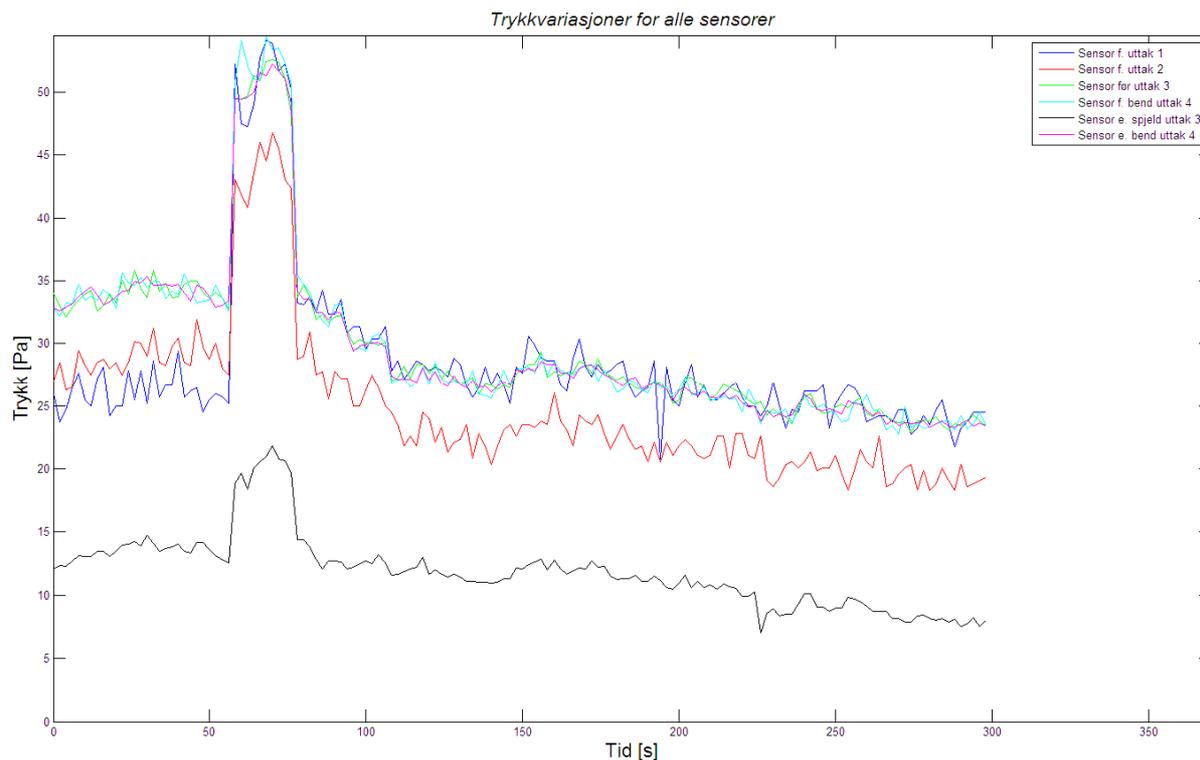
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-37. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 1 stenges etter 60 sekunder og viften styres etter sensorplassering før uttak 2 (Scenario 11). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

Som Figur 8-37 viser er det statiske trykket for sensoren før uttak 2 noenlunde lik både før og etter stenging og viftejustering, noe som er naturlig da det er dette statiske trykket viften styres etter. Men mens det for scenario 9 og 10 også førte til like trykk for de andre sensorene også (bortsett fra sensoren plassert før uttak 1), ble det i dette tilfellet registrert noe høyere statiske trykk i de andre sensorene (i størrelsesorden 3 Pa), enn det som var utgangspunktet før stenging og viftejustering. Scenario 12 resulterte i det motsatte. Det vil si at det statiske trykket for sensorene som ikke styrte viften, registrerte en del lavere trykk enn utgangspunktet (ca. 8-9 Pa). De samme resultatene gjelder også for de andre scenarioene hvor sensorplasseringen er før uttak 1, det vil si scenario 13-15.

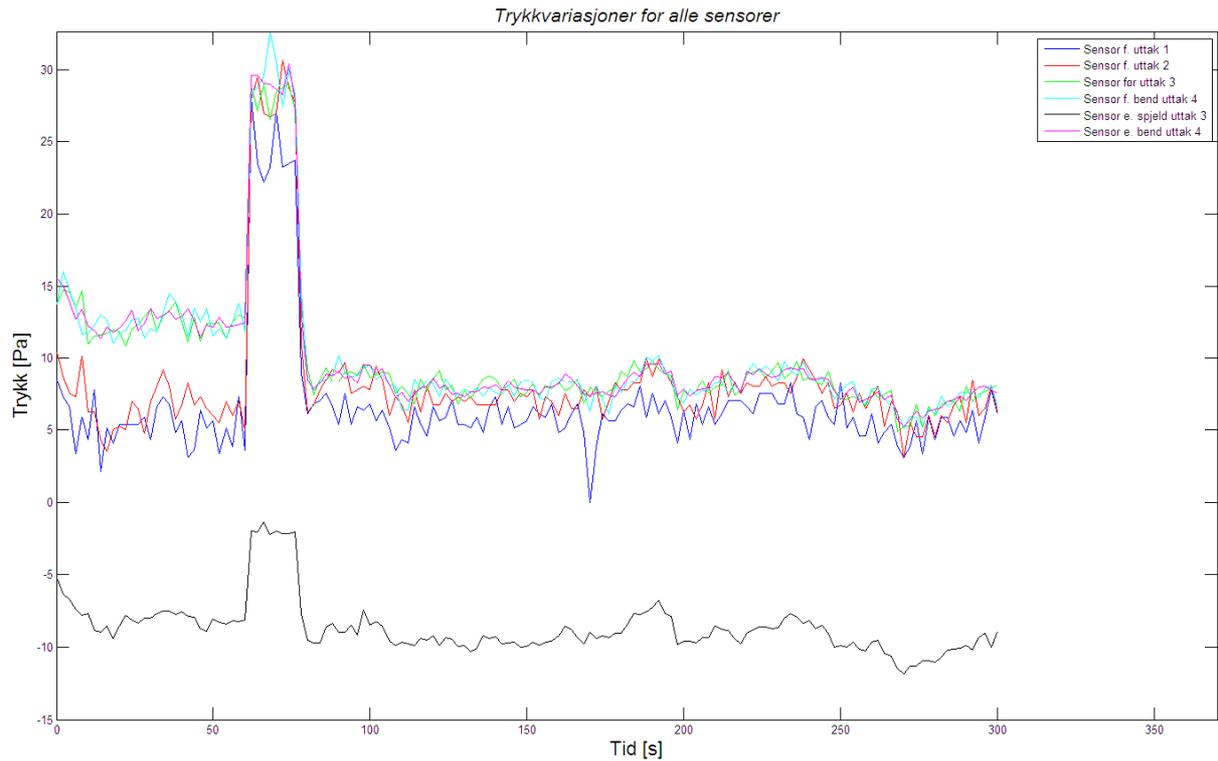
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



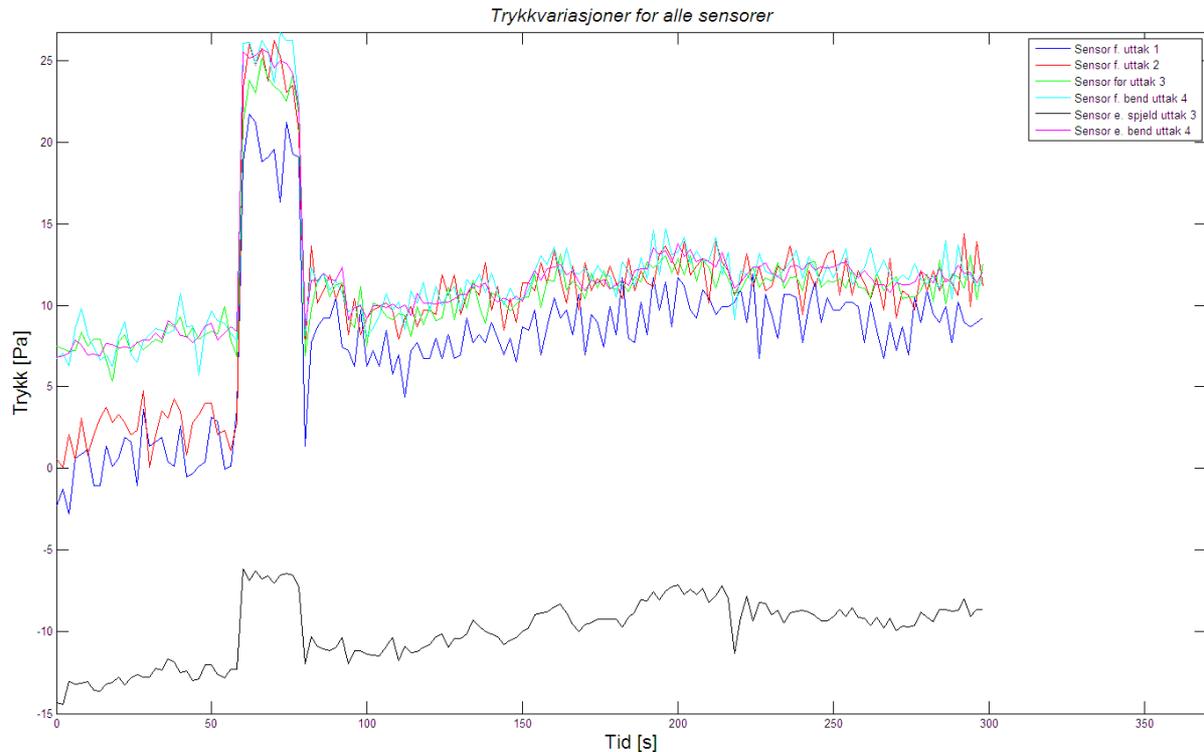
Figur 8-38. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 1 stenges etter 60 sekunder og viften styres etter sensorplassering før uttak 1 (Scenario 12). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

Den samme trenden gjelder også for scenarioer hvor viften styres etter andre sensorplasseringer enn før uttak 1. Trykket før og etter stenging og viftejustering er forholdsvis like for sensoren det styres etter, spesielt hvis man ser bort fra svingningene. Trykkforholdene for de andre sensorene derimot, avviker fra utgangspunktet i forhold til hvilke uttak som stenges, noe Figur 8-39 viser et godt eksempel på for scenario 18. Figuren viser at de statiske trykkene for alle sensorene etter uttak 2 reduseres, noe som igjen burde føre til lavere luftmengder enn ønsket. For den oppmerksomme leser vil man også registrere at verdiene for statisk trykk i dette scenarioet ligger en god del lavere enn i de forrige scenarioene, og sensoren plassert etter spjeld i uttak 3 viser til og med negative verdier. Dette er trolig en konsekvens av et annet atmosfærisk trykk under måling av disse scenarioene, enn ved kalibrering, da trykktransducerne måler en differanse i forhold til atmosfærisk trykk. Dette har dog ingen påvirkning for å analysere trykkforholdene sensorene seg imellom. Et annet godt eksempel på avvik i trykkforhold er scenario 21, hvor sensoren er plassert før uttak 3 og uttak 2 stenges. Figur 8-40 viser da at trykkene stiger i forhold til utgangspunktet for de sensorene det ikke styres etter. Faktisk stiger trykket i sensoren viften styres etter også, noe som ikke er korrekt. Grunnen til dette kan være trykksvingninger etter at viften er justert, eller endringer i det atmosfæriske trykket underveis i loggingen.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



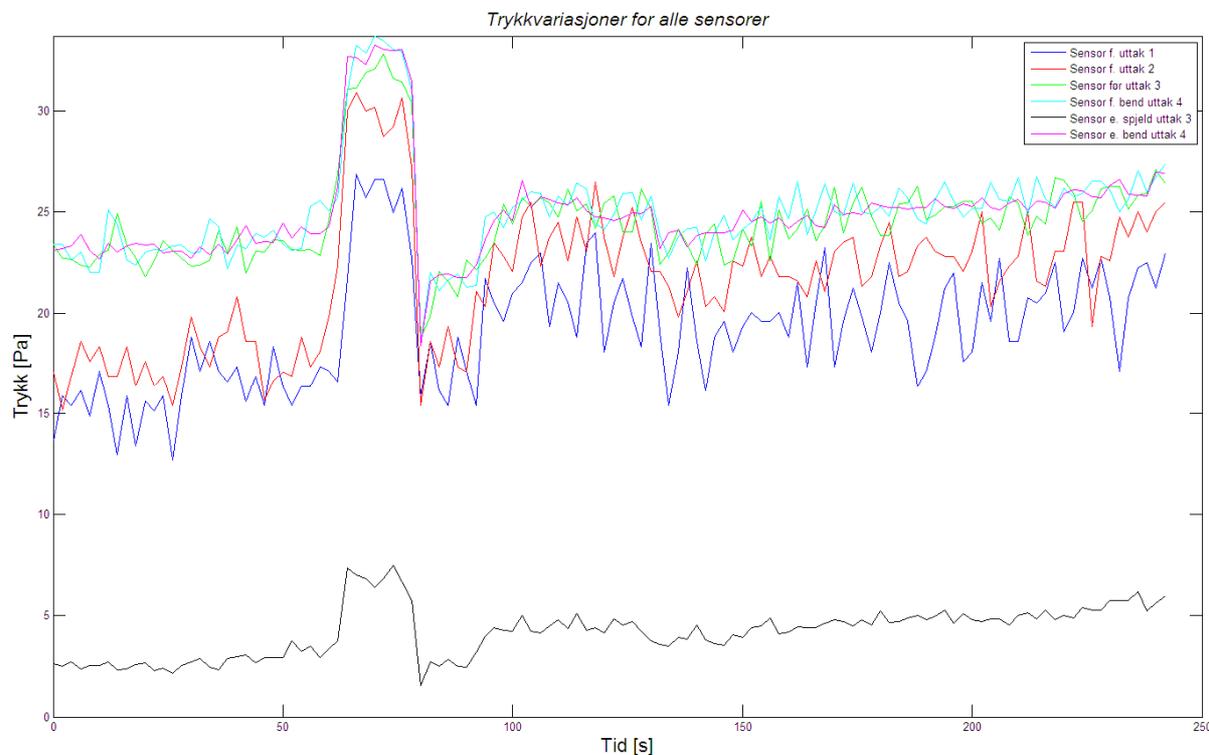
Figur 8-39. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 2 stenges etter 60 sekunder og viften styres etter sensorplassering før uttak 2 (Scenario 18). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.



Figur 8-40. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 2 stenges etter 60 sekunder og viften styres etter sensorplassering før uttak 3 (Scenario 21). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

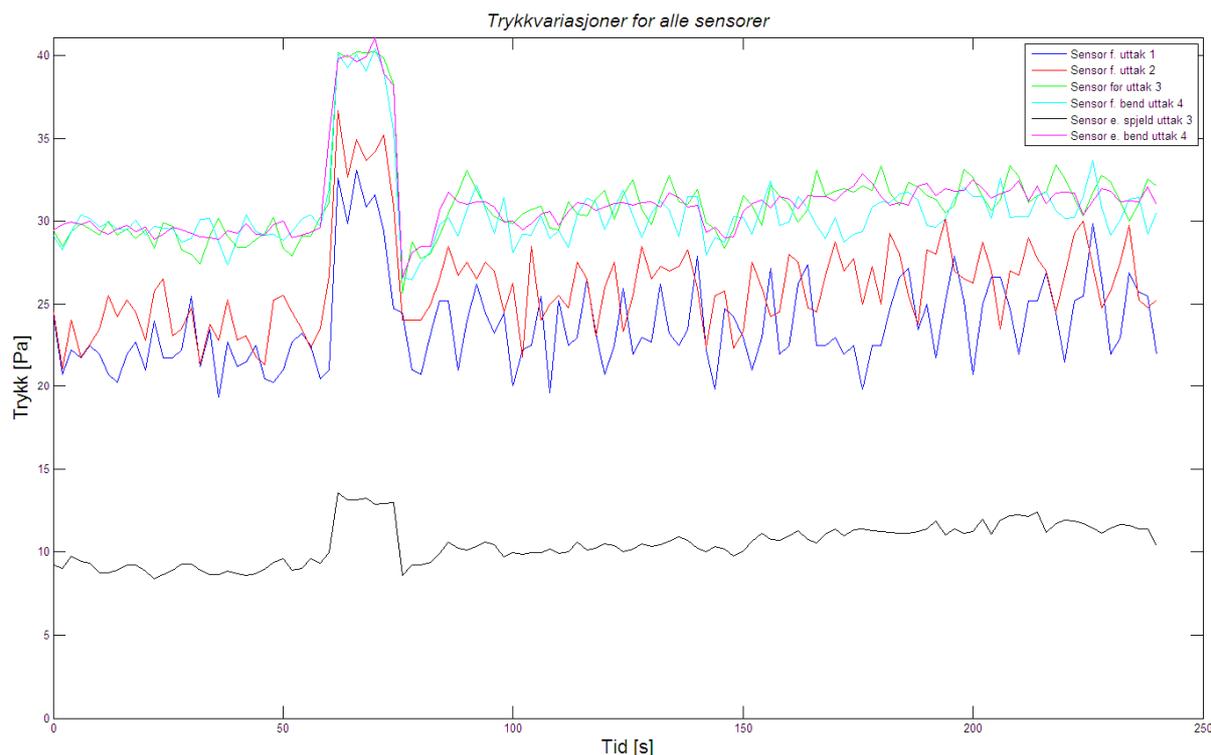
Når det gjelder resultater fra scenarioene 28-33, hvor det ble simulert en case hvor VAV-spjeldene ble etterjustert når viftepådraget ble endret, er det også et par interessante forhold som fremgår av Figur 8-41 og Figur 8-42.



Figur 8-41. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 2 reduseres etter 60 sekunder og viften styres etter sensorplassering før uttak 3 (Scenario 32). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

I scenario 32 og 33 ble vifte og "VAV-spjeld" justert om hverandre for å tilstrebe både et konstant statisk trykk lik den opprinnelige verdi, samt en korrekt luftmengde i forhold til innregulert verdi. Denne fremgangsmåten fører til hyppige endringer i trykkforhold i kanalnettet, noe som også fremgår av figurene over og under. Figurene viser at verdiene for sensorene plassert før uttak 1 og 2 varierer mye mer enn de andre, spesielt i forhold til trykket etter bend i uttak 4 som er meget stabilt. Disse resultatene indikerer at sensorene nærmest viften er mye mer sensitive og reagerer kraftigere på de små justeringene av viftepådrag, enn sensorene plassert lengre unna. Videre vil det redegjøres om resultater fra beregninger for disse trykksvingninger, for å forsøke å finne eventuelle sammenhenger mellom stabilitet og plassering av trykksensor på bakgrunn av laboriemålingene som nå er presentert.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-42. Bildet viser grafer av de statiske trykkvariasjonene for de ulike sensorplasseringene når uttak 4 reduseres etter 60 sekunder og viften styres etter sensorplassering før uttak 3 (Scenario 33). Grafene er plottet ved hjelp av Matlab.

8.7.3.1 Trykksvingninger

Som figurene for statiske trykk viser, er det relativt store svingninger i verdiene. Svingninger i trykket i et ventilasjonsanlegg er helt naturlig og er en konsekvens av blant annet turbulent luftstrøm og fluktuasjoner i viften. Disse svingningene kan variere avhengig av hvor i kanalnettet man ser. Det var av interesse å undersøke hvor disse trykksvingningene var lave, for å få en indikasjon på hvor trykket var mest stabilt, noe som igjen gir en mer stabil regulering av ventilasjonsanlegget. Som et mål for denne indikasjonen, ble det beregnet et standardavvik for hver enkelt sensor i hver enkelt scenario (se Figur 8-43), etter følgende formelen under. Standardavvik er et mål for spredningen av verdiene i et datasett, og er godt egnet til dette formålet.

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

hvor

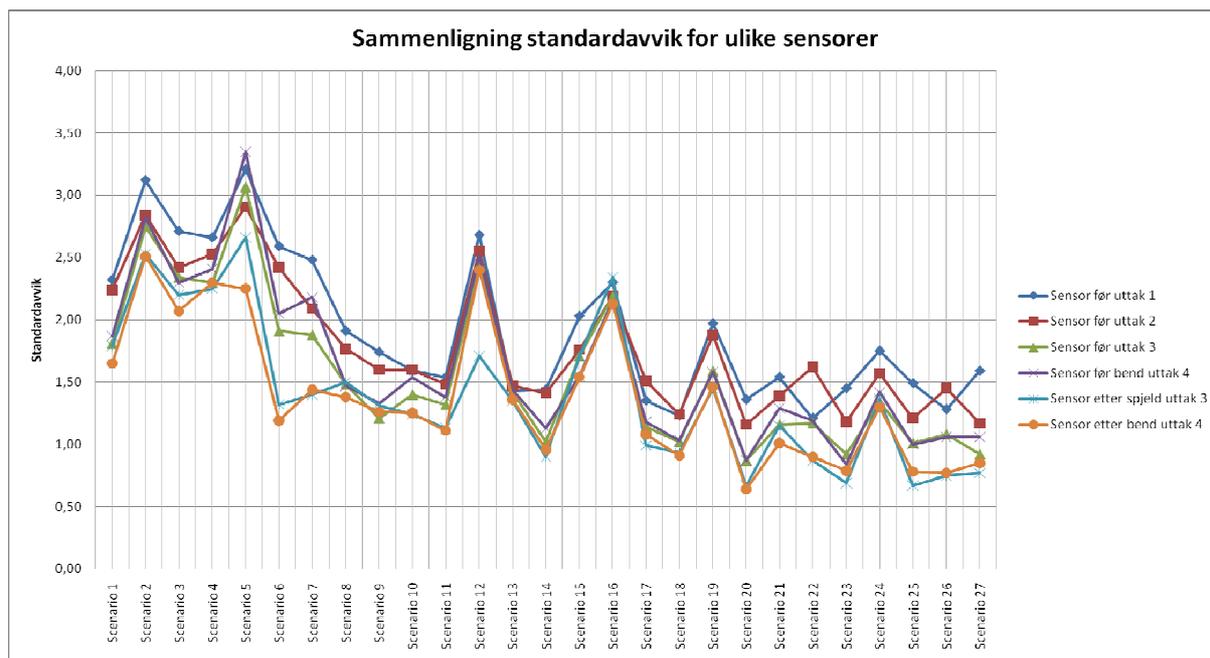
σ = standardavvik

N = antall målepunkter

x_i = målepunktverdi for det aktuelle punktet

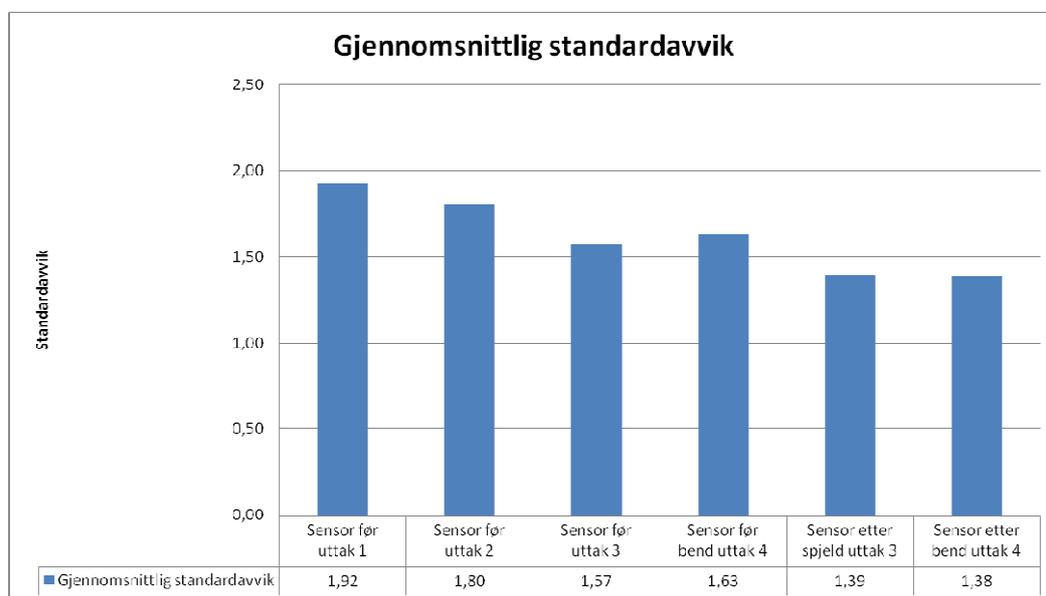
x_{avg} = gjennomsnittlig måleverdi for alle målepunkter

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-43. Diagrammet viser standardavvik for de ulike sensorplasseringene ved ulike scenarier. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Alle beregnede standardavvik for den enkelt sensorplassering ble også summert, med den hensikt å presentere et gjennomsnittlig standardavvik for de ulike sensorplasseringene. Figur 8-44 viser et stolpediagram som sammenligner de gjennomsnittlige standardavvikene.



Figur 8-44. Stolpediagrammet viser gjennomsnittlig standardavvik for de ulike sensorplasseringene. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

I følge Figur 8-44 har sensoren før uttak 1 det høyeste gjennomsnittlige standardavviket, mens sensorene etter bend i uttak 4 og etter spjeld i uttak 3 har lavest verdi. Resultatene fra disse beregningene antyder dermed at trykkforholdene i dette aktuelle kanalnettet er mest ustabile i starten av kanalnettet, altså ved uttak 1 og 2. De indikerer også at trykksvingningene er minst på enden av kanalnettet. Denne trenden er

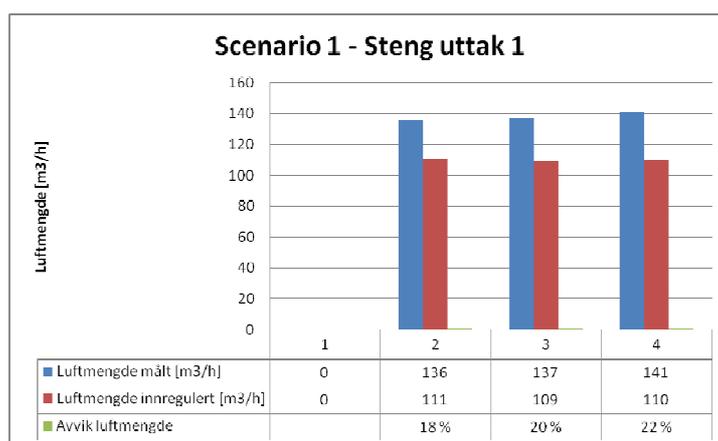
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

dog ikke helt samstemt med forholdene midtveis i kanalnettet, hvor verdiene viser at det er større trykksvingninger før uttak 4 enn før uttak 3. Det er med andre ord ikke et lineært forhold mellom trykkvariasjon og posisjon i kanalnettet, selv om det kan synes slik ved kun å se på starten og slutten av kanalnettet.

Komplett oversikt over beregning av standardavvik og gjennomsnittlige standardavvik for alle ulike sensorplasseringer og scenarier vises i vedlegg 18.

8.7.4 Luftmengdefordeling – resultat og diskusjon

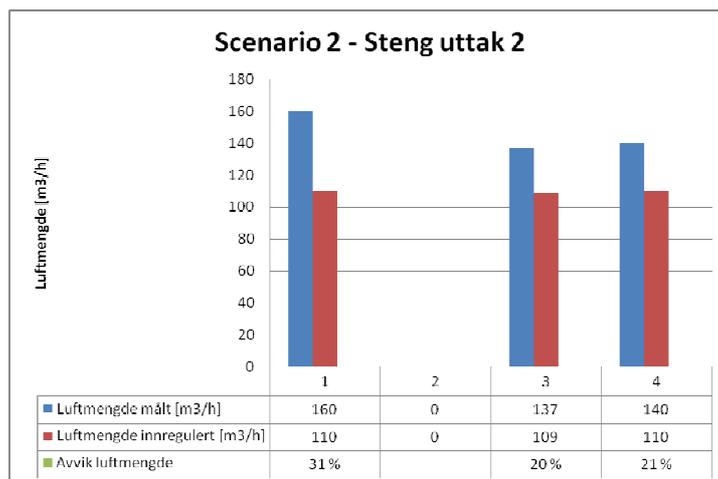
I tillegg til måling og logging av statisk trykk i ulike posisjoner i kanalnettet, ble det foretatt luftmengdemålinger. For å se på konsekvensen av de ulike sensorplasseringene og scenarioene i forhold til luftmengdefordeling, ble derfor alle uttak målt, samt at avviket mellom målt og innregulert verdi (ønsket verdi) registrert. Fremgangsmåten er beskrevet i metodekapittelet. Videre presenteres resultatene for luftmengdefordeling for de scenarioene som særskilt er trukket frem under kapittelet om logging av trykk, slik at resultatene fra disse kan sammenlignes, i tillegg til andre scenarier som resulterte i interessante luftmengdemålinger. Samtlige diagrammer og tabeller for alle scenarier er dog vedlagt rapporten som vedlegg 18.



Figur 8-45. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 1 stenges (Scenario 1). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Figur 8-45 viser en god luftmengdefordeling mellom uttak 2-4, men hvor avviket i luftmengden øker utover i kanalnettet, dog kun med noen få prosent. Selve luftmengdene alene er selvfølgelig mye høyere enn ønsket verdi (innregulert verdi), men dette er resultatet av en vifte som ikke reduserer pådraget, men kun leverer den samme totalluftmengden som før stenging av uttak. Logging av statisk trykk for det samme scenarioet viser en noe høyere trykkøkning før bend i uttak 4 enn før uttak 3, og kan gi en forklaring for hvorfor luftmengden er høyere i uttak 4 enn i uttak 3. Samme forklaring kan være gjeldende for uttak 3, som har en mindre trykkøkning enn uttak 3 og 4. En god sammenligning av luftmengder og trykk må foregå på bakgrunn av totaltrykket, som både tar hensyn til det statiske og det dynamiske trykket, så det kan nødvendigvis ikke trekkes konkrete konklusjoner for statisk trykk og luftmengder. Dog kan det gi en god indikasjon for å forklare avvikene i luftmengdene. For scenario 2 hvor uttak 2 ble stengt av, viser Figur 8-46 er mye mer skjevfordelt luftmengdefordeling.

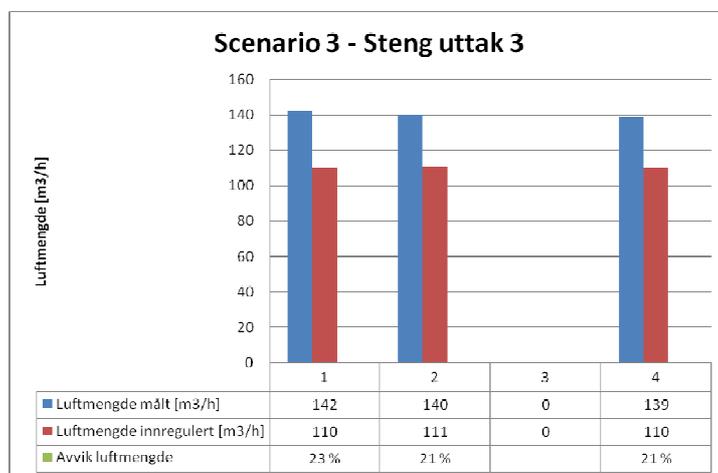
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-46. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 2 stenges (Scenario 2). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Luftmengden i uttak 1 blir en god del høyere enn for de to andre uttakene, men dette kan vanskelig forklares ved å se på de statiske trykkendringene som ble logget samtidig, da det statiske trykket før uttak 1 ikke øker mer enn det statiske trykket før uttak 3 og 4. Det er likevel kjent at totaltrykket i kanalnettet øker som følge av større motstand som oppstår på bakgrunn av høyere lufthastigheter og dermed større trykkfall. Samtidig er det dynamiske trykket mye høyere når lufthastigheten stiger, slik at den delen av totaltrykket som utgjør statisk trykk ikke nødvendigvis øker så mye. Scenario 2 gir også tilfellet med størst totalluftmengde hvis man baserer seg på summering av luftmengder målt i uttak, se Figur 8-63. Når totalluftmengden ble målt ved hjelp av måleblende før viften, viser Figur 8-64 en lik totalluftmengde for scenarioene 2-4.

Scenario 3 gir en jevnere luftmengdefordeling i forhold til uttakene seg i mellom, men fortsatt med en noe høyere verdi for det første uttaket. Dette er dog minimalt. Figur 8-47 viser at avviket i luftmengden blir noe høyere for uttak 1, men logging av statisk trykk i dette tilfellet viser at trykkøkningen er større før uttak 2 enn før uttak 1.

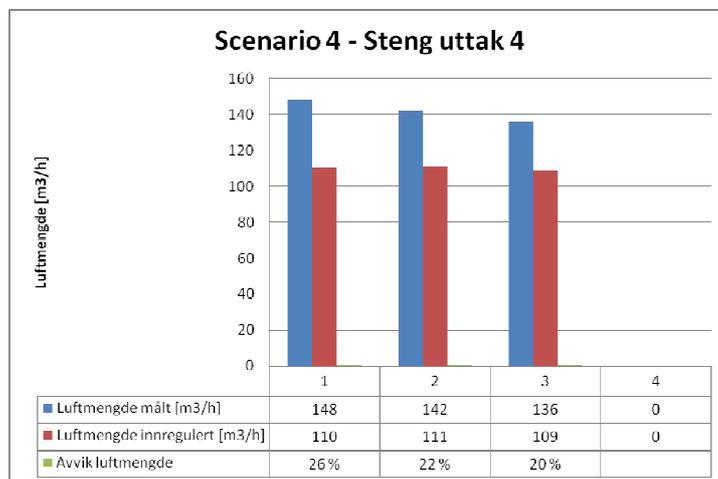


Figur 8-47. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 3 stenges (Scenario 3). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

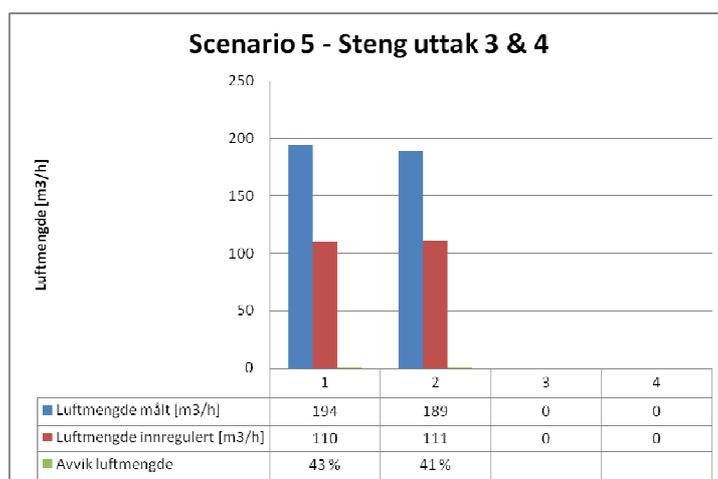
En høyere trykkøkning gir i dette scenarioet ikke et høyere avvik for luftmengder, altså motsatt av resultatene fra scenario 1, se Figur 8-47.

Det opereres også med veldig små avvik i luftmengder, og i flere tilfeller mindre enn verdien på usikkerheten rundt målemetoden. Dette diskuteres videre i kapittel 8.9.



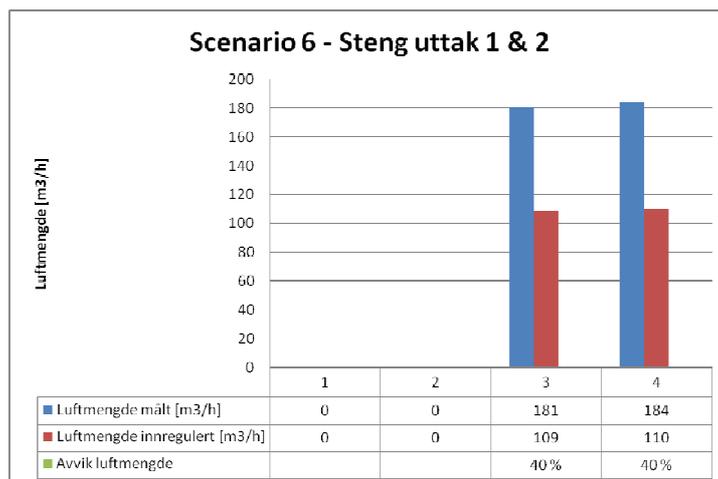
Figur 8-48. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 4 stenges (Scenario 4). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Når uttak 4 ble stengt i forbindelse med scenario 4, ga resultatene igjen en mer skjev luftmengdefordeling, se Figur 8-48. Skjevfordelingen oppfører seg på samme måte som i scenario 1, hvor det registreres en stigende luftmengde fra uttak 2 og utover. I dette tilfellet fås samme trend, bare motsatt. Det vil si at luftmengdene stiger fra uttak 3 mot uttak 1. Totalluftmengden ble høyere for scenario 4 enn for scenario 1. Samme resultat vises i Figur 8-49 og Figur 8-50, som presenterer luftmengdefordeling når henholdsvis siste og første del av kanalnettet stenges. Luftmengdefordelingen uttakene seg imellom er meget gode.



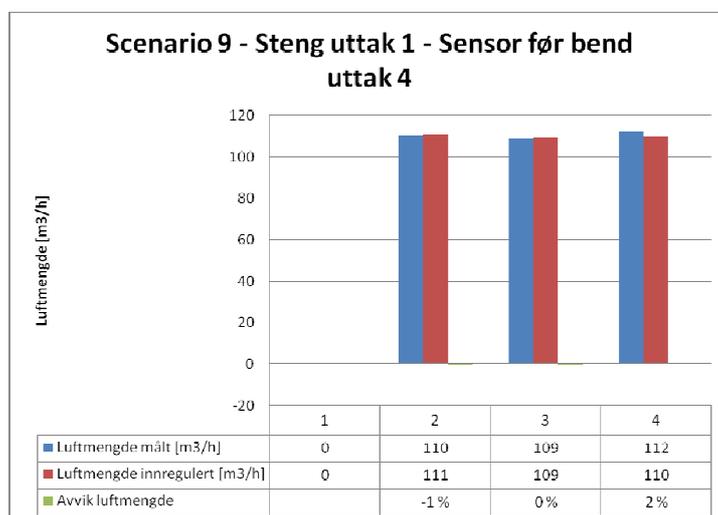
Figur 8-49. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 3 og 4 stenges (Scenario 5). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-50. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 1 og 2 stenges (Scenario 6). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Videre presenteres luftmengdefordelingen for scenarioene som innebar justering av viftepådrag etter stenging (scenario 8-27). De første resultatene som fremstilles i denne sammenheng er fra scenario 9. I likhet med scenario 1 ble uttak 1 stengt. Luftmengdefordelingen mellom uttak 2-4 ble helt likt for scenario 1 og 9, hvor avviket mellom målt og innregulert luftmengde var minst i uttak 2 og stigende utover. For scenario 9 varierte de avvikende luftmengdene mellom -1 og 2 %, mens det for scenario 1 varierte mellom 18 og 20 %. Avviket er selvsagt mye lavere for scenario 9, da det i dette tilfellet ble foretatt enn justering av viftepådraget på bakgrunn av en valgt sensorplassering. Se Figur 8-51 for grafisk fremstilling.

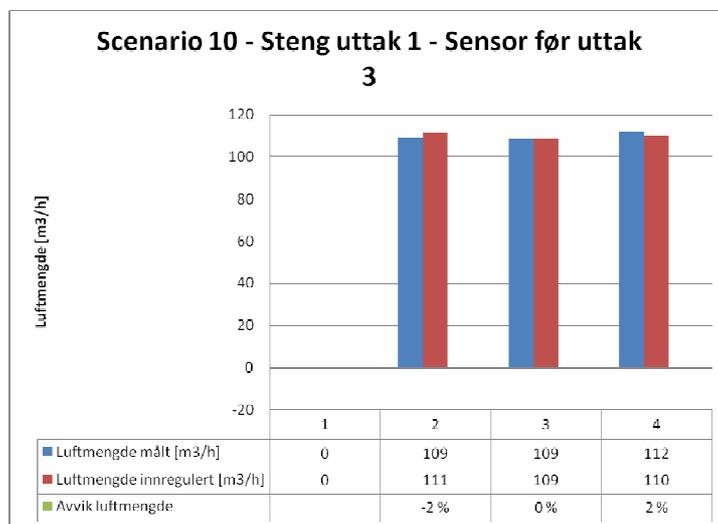


Figur 8-51. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 1 stenges og viften styres etter sensorplassering før bend ved uttak 4 (Scenario 9). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

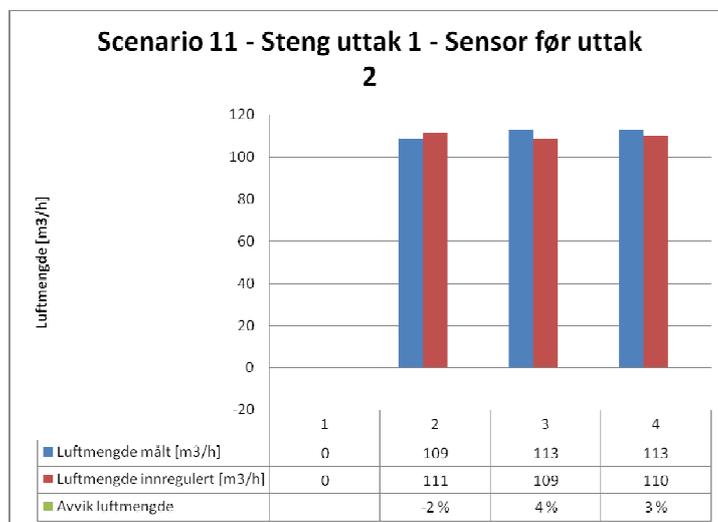
Som beskrevet ovenfor resulterte scenario 9 i en god luftmengdefordeling. I dette aktuelle scenarioet ble viften justert på bakgrunn av å holde et konstant trykk før bend i uttak 4. Det var dermed av interesse å få en oversikt over hvilke resultater som ble gjeldende for andre sensorplasseringer. Scenario 10-12 dekker de andre sensorplasseringene. Som Figur 8-52 og Figur 8-53 viser, ble luftmengdefordelingen

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

veldig lik når sensoren ble plassert før uttak 3, mens det avviker minimalt ved sensorplassering før uttak 2.



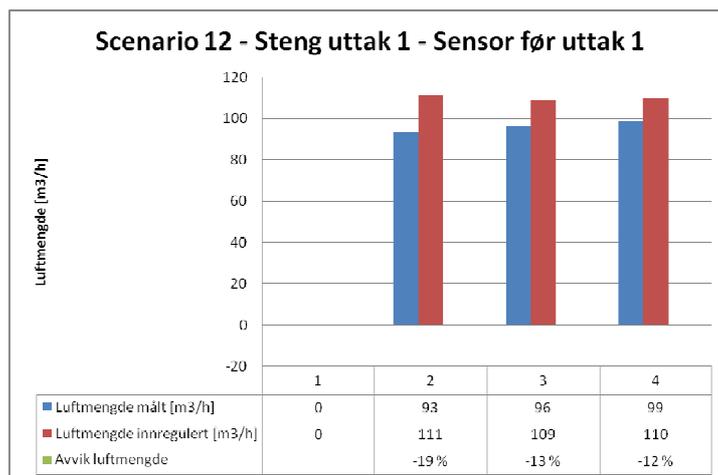
Figur 8-52. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 1 stenges og viften styres etter sensorplassering før uttak 3 (Scenario 10). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.



Figur 8-53. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 1 stenges og viften styres etter sensorplassering før uttak 2 (Scenario 11). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

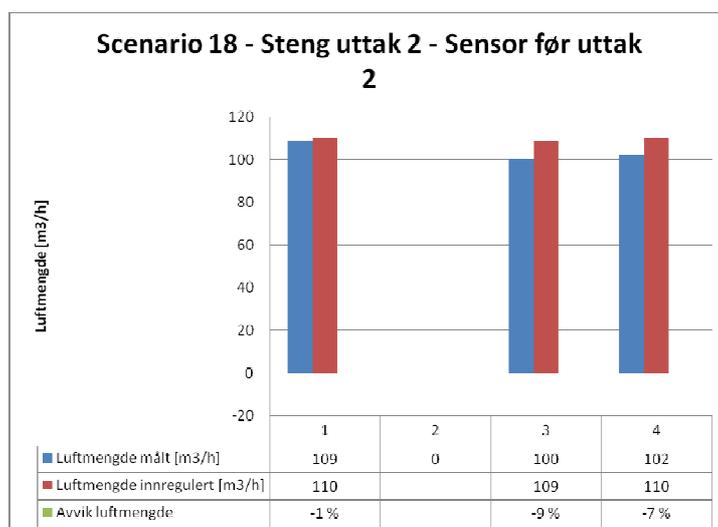
Når det gjelder luftmengdefordelingen når sensoren er plassert før uttak 1 (Scenario 12) blir resultatene noe helt annet. Som Figur 8-54 viser, blir luftmengdene mye lavere enn ønsket, i tillegg til at fordelingen blir noe skjev. I likhet med scenario 1 stiger luftmengdene utover i kanalnett.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-54. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 1 stenges og viften styres etter sensorplassering før uttak 1 (Scenario 12). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

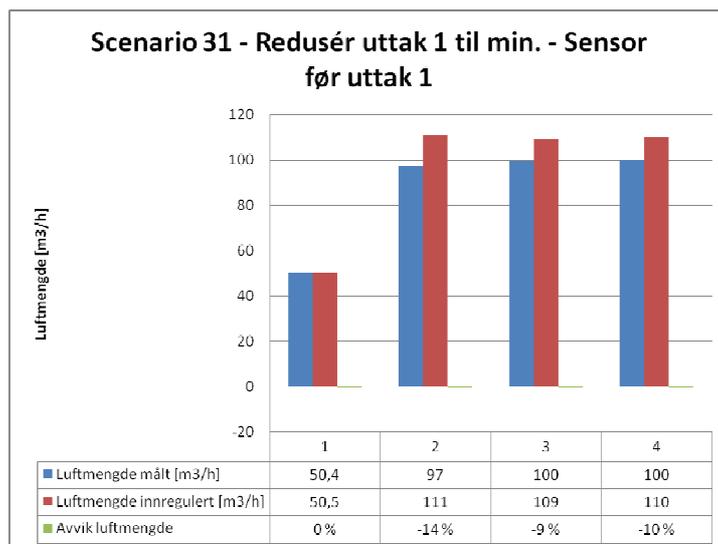
Samme trend ble registrert for scenario 18, hvor uttak 2 ble stengt og sensoren plassert før uttak 2, se Figur 8-55. Luftmengdene etter uttaket som stengt, ble mye lavere enn ønsket når sensoren også var plassert rett før det uttaket som ble stengt. Altså det samme som oppsto for scenario 12.



Figur 8-55. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 2 stenges og viften styres etter sensorplassering før uttak 2 (Scenario 18). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

For målinger av luftmengder når VAV-spjeldene ble etterjustert som følge av luftmengdejustering (scenario 28-33), gjaldt noen av de samme slutningene i forhold til luftmengder og sensorplassering. Igjen vises det at luftmengdene blir for lave når uttak 1 stenges/strupes samtidig som sensoren er plassert før uttak 1, på lik linje med scenario 12. Det kan dog ikke sies at luftmengdene stiger i særskilt grad utover i kanalnettet, slik det fremgår av scenario 1 og 12, bortsett fra en svak økning mellom uttak 2 og 3.

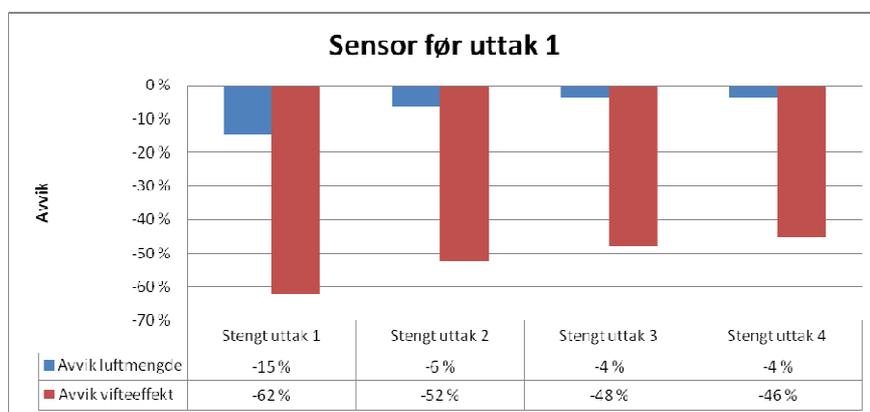
Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-56. Figuren viser luftmengdefordeling og avvik mellom målt og innregulert luftmengde, når uttak 1 reduseres og viften styres etter sensorplassering før uttak 1 (Scenario 31). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

8.7.4.1 Luftmengdefordeling – samlet oversikt – resultater og diskusjon

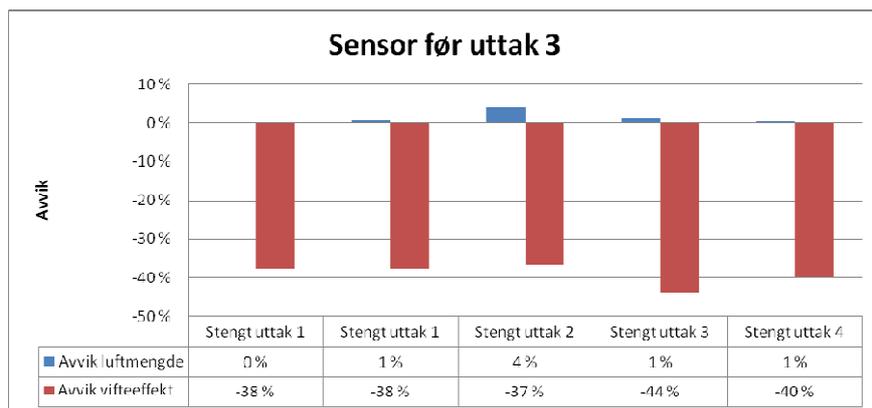
For ikke kun å presentere verdier for de ulike scenarioene enkeltvis, ble det også produsert grafikk for lettere å sammenligne på tvers av scenarioene. Noen av disse presenteres nedenfor. Samtlige tabeller og grafiske diagrammer er vedlagt rapporten som vedlegg 18.



Figur 8-57. Figuren viser avvik mellom målt og innregulert hovedluftmengde, samt avvik mellom vifteeffekt før og etter viftejustering. Verdiene gjelder for scenarioer hvor viften ble styrt etter sensorplassering før uttak 1. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

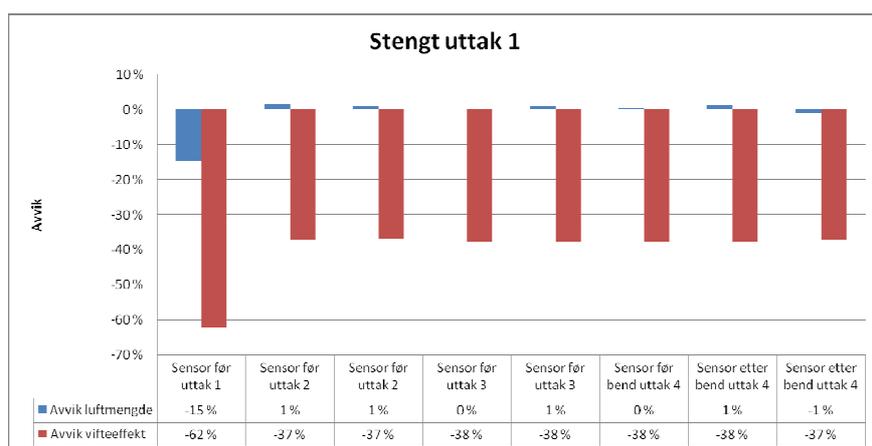
Grafen i Figur 8-57, presenterer på en god måte de sammenhengene som ble registrert når de ulike scenarioene ble gjennomgått tidligere. Som tidligere beskrevet blir luftmengdeavvikene relativt store når viften styres etter sensorplassering før uttak 1. For de andre sensorplasseringene var ikke dette tilfellet, noe Figur 8-58 viser resultatene når sensoren var plassert før uttak 3. Det er verdt å legge merke til at hovedluftmengden i scenarioer med sensorplassering før uttak 1 konsekvent blir lavere enn ønsket, og motsatt for uttak 3.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



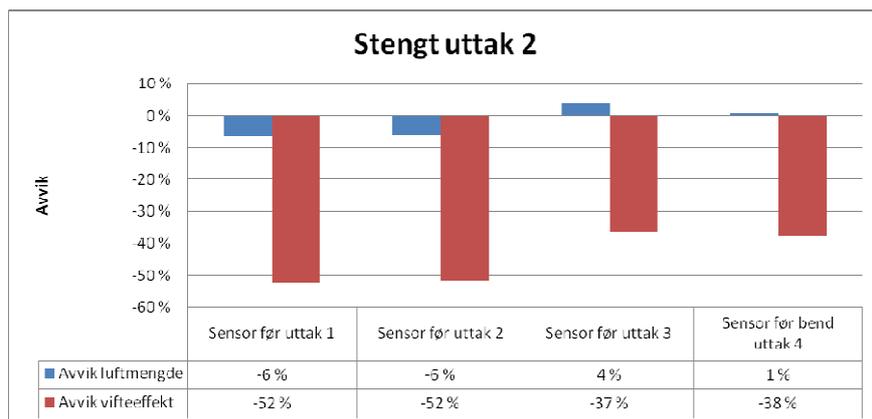
Figur 8-58. Figuren viser avvik mellom målt og innregulert hovedluftmengde, samt avvik mellom vifteeffekt før og etter viftejustering. Verdiene gjelder for scenarioer hvor viften ble styrt etter sensorplassering før uttak 3. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Tilsvarende grafikk ble produsert for aktuelle uttak, med ulike sensorplasseringer. Figur 8-59 viser et eksempel som sammenligner de scenarioene hvor uttak 1 stenges, Figur 8-60 gjelder for uttak 2, mens Figur 8-61 gjelder for stenging av uttak 3. Som figurene viser er det stenging av uttak 2 som medfører størst avvik i luftmengder sett samlet, mens stenging av uttak 1 og sensor før uttak 1 fører til det største avviket isolert sett.

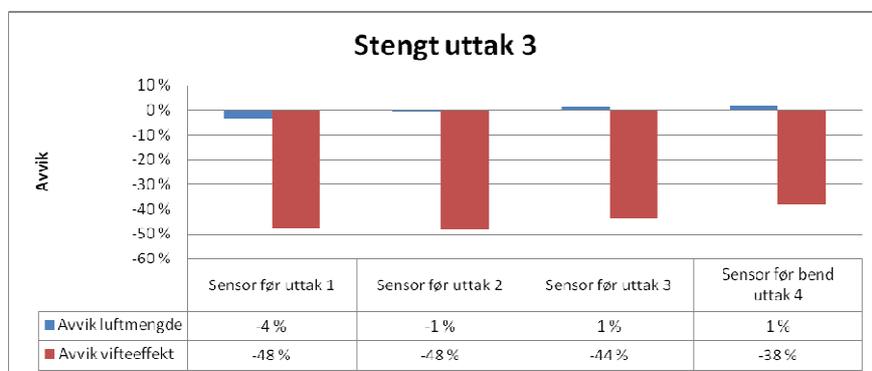


Figur 8-59. Figuren viser avvik mellom målt og innregulert hovedluftmengde, samt avvik mellom vifteeffekt før og etter viftejustering. Verdiene gjelder for scenarioer hvor uttak 1 ble stengt. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-60. Figuren viser avvik mellom målt og innregulert hovedluftmengde, samt avvik mellom vifteeffekt før og etter viftejustering. Verdiene gjelder for scenarier hvor uttak 2 ble stengt. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

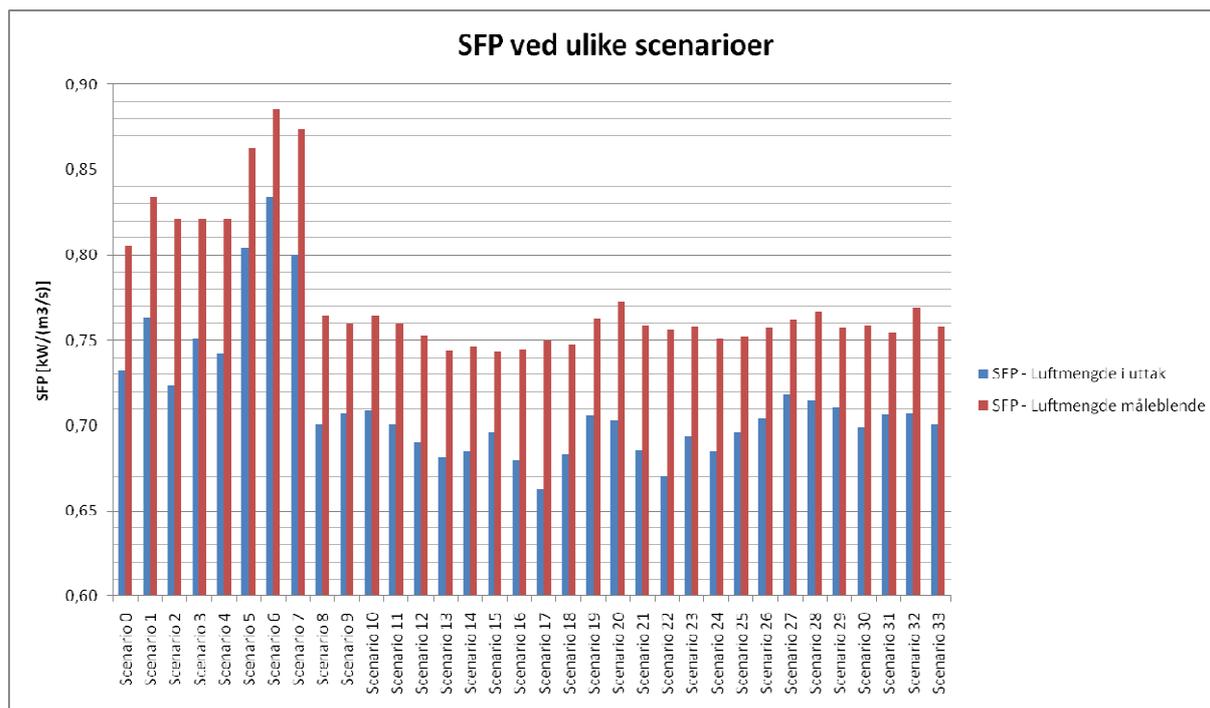


Figur 8-61. Figuren viser avvik mellom målt og innregulert hovedluftmengde, samt avvik mellom vifteeffekt før og etter viftejustering. Verdiene gjelder for scenarier hvor uttak 3 ble stengt. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

8.7.5 SFP og energibruk

For å kartlegge energibehovet og energieffektiviteten til ventilasjonssystemet under de ulike scenarioene, ble det tilkoblet en effektanalysator for å registrere viftens effektbehov til enhver tid. Det aktuelle scenarioets SFP-verdi ble også beregnet, ved hjelp av formel i 8.8, for å se på eventuelle sammenhenger, trender eller uregelmessigheter mellom luftmengder og effektbehov. Figur 8-62 viser en oversikt over SFP-verdien ved de ulike scenarioene. Når diagrammet analyseres er det viktig å ha i bakhodet at de 34 ulike scenarioene ikke er helt sammenlignbare, da det ble foretatt fire ulike måleprosedyrer (se oversikt på side 99).

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

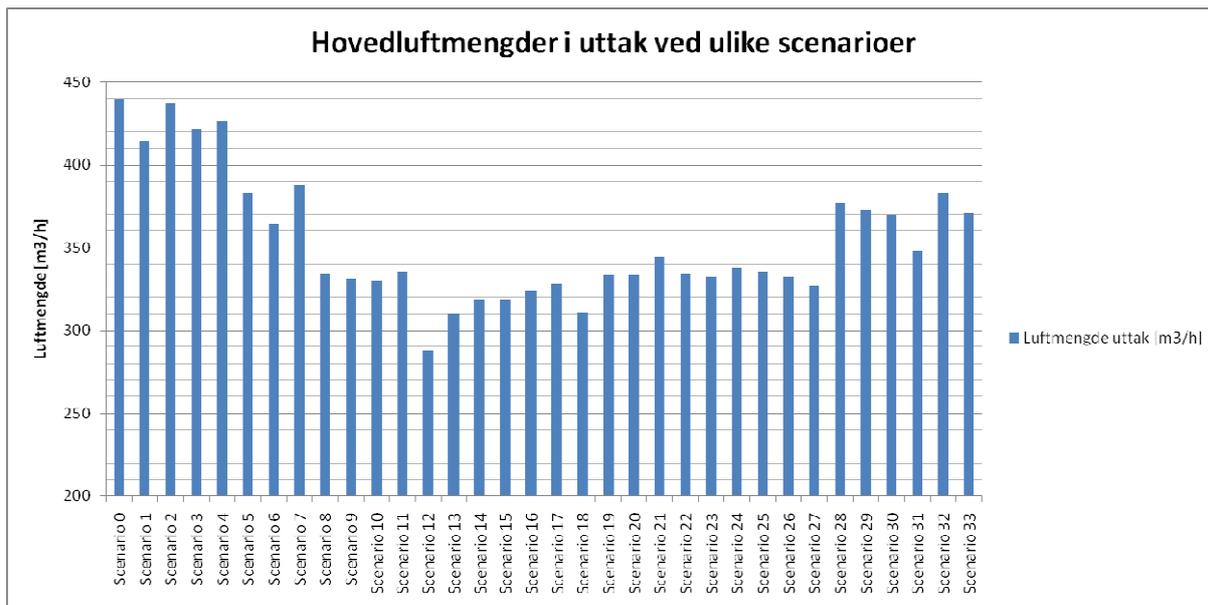


Figur 8-62. Stolpediagrammet viser oversikt over SFP-verdi ved de ulike scenarioene. Blå stolpe er beregnet på bakgrunn av målt luftmengde i uttak, og rød på bakgrunn av luftmengde i måleblende. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

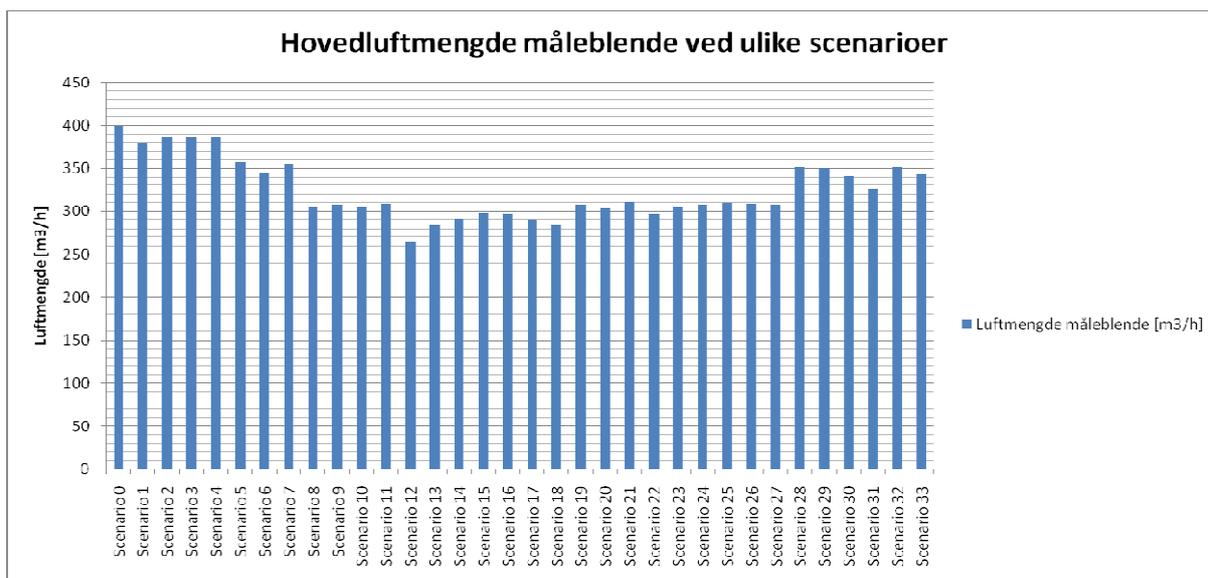
Som Figur 8-62 viser, blir SFP-verdien forskjellig på bakgrunn av hvilken hovedluftmengde som velges som grunnlag for beregning, samlet luftmengde fra målinger i uttak ved hjelp av måletrakt eller hovedluftmengde målt ved med måleblende montert før viften, se Figur 8-63 og Figur 8-64. Avviket i SFP-verdien lå på mellom 6 og 12 prosent, hvor SFP-verdien ble høyest når hovedluftmengden registrert ved hjelp av måleblendens ble benyttet som grunnlag. Dette skyldes det faktum at luftmengden i måleblendens ble målt lavere enn den totale luftmengden fra summering av luftmengdene i uttakene. Da det er knyttet lavere usikkerhet til bruk av måleblende kontra måletrakt, er det valgt å benytte SFP-verdiene som er beregnet ved hjelp av luftmengdene fra måleblendens for videre resultatvurdering.

I følge Figur 8-62 er det derfor scenario 15 som resulterer i den laveste SFP-verdien. I dette scenarioet ble uttak 4 stengt, mens trykksensoren som styrte viftepådraget var plassert før uttak 1. Vifteeffekten i dette tilfellet ble lavt (61,5 W, se Figur 8-65) og hovedluftmengden var også blant de laveste (298 m³/h, se Figur 8-64), men det er det gunstige forholdet mellom disse to verdiene som fører til en lav SFP-verdi, ikke de lave verdiene i seg selv. Den største verdien inntraff i scenario 6, hvor uttak 1 og 2 ble stengt uten at viftepådraget ble redusert. Dette resulterte selvfølgelig i høye trykkforhold (rundt 85 Pa), noe både målinger og tall fra logger viser. Dette gir følgelig en høy SFP-verdi. Dette stemmer godt med formelen som viser at SFP-verdien kan beregnes ved hjelp av trykk og virkningsgrad, og som også uttrykker at SFP-verdien øker når trykket øker (gitt at virkningsgraden ikke øker tilsvarende).

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



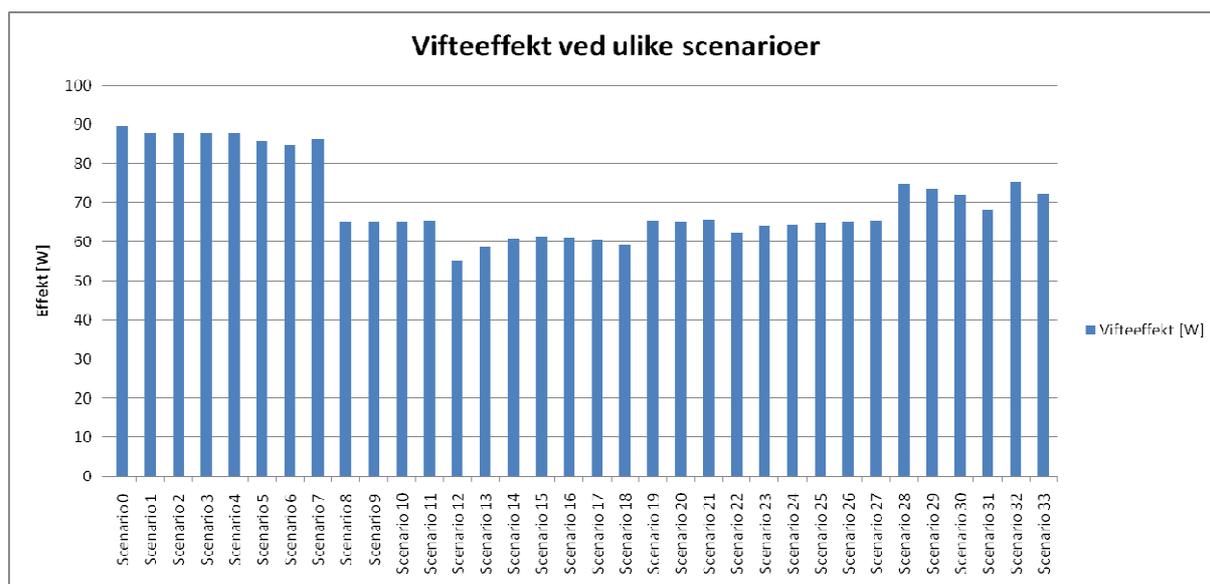
Figur 8-63. Diagrammet viser oversikt over hovedluftmengde ved de ulike scenarioene. Verdiene er basert på bruk av måletrakt i uttakene. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.



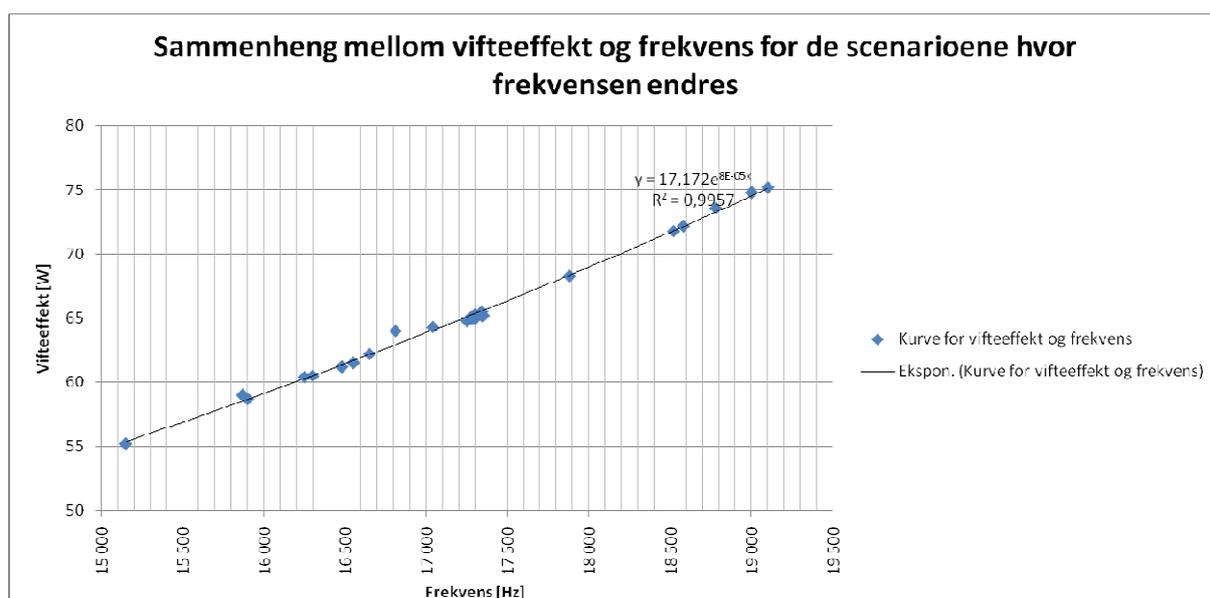
Figur 8-64. Diagrammet viser oversikt over hovedluftmengde ved de ulike scenarioene. Verdiene er basert på bruk av måleblende. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

SFP-verdiene varierer, som Figur 8-62 viser, fra 0,74 til 0,89 kW/(m³/s). Da SFP beregnes som summen av alle vifteeffektene dividert med den leverte luftmengden, blir SFP-verdien i dette tilfellet lav fordi ventilasjonsanlegget i dette forsøket kun er snakk om et tilluftsanlegg. Hvis det hadde vært tilknyttet en avtrekksvifte i forbindelse med kanalnettet, som hadde i oppgave å fjerne luftmengden tilsvarende det tilluftsviften leverte, ville det samlede effektbehovet vært doblet, gitt at avtrekksviften var av samme type som tilluftsviften. Dette ville dermed resultere i en dobbelt så høy SFP-verdi. Det kan derfor antas at SFP-verdiene ville variert fra 1,48 til 1,78 kW/(m³/s), hvis kanalnettet hadde vært bygd opp som et balansert ventilasjonssystem.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



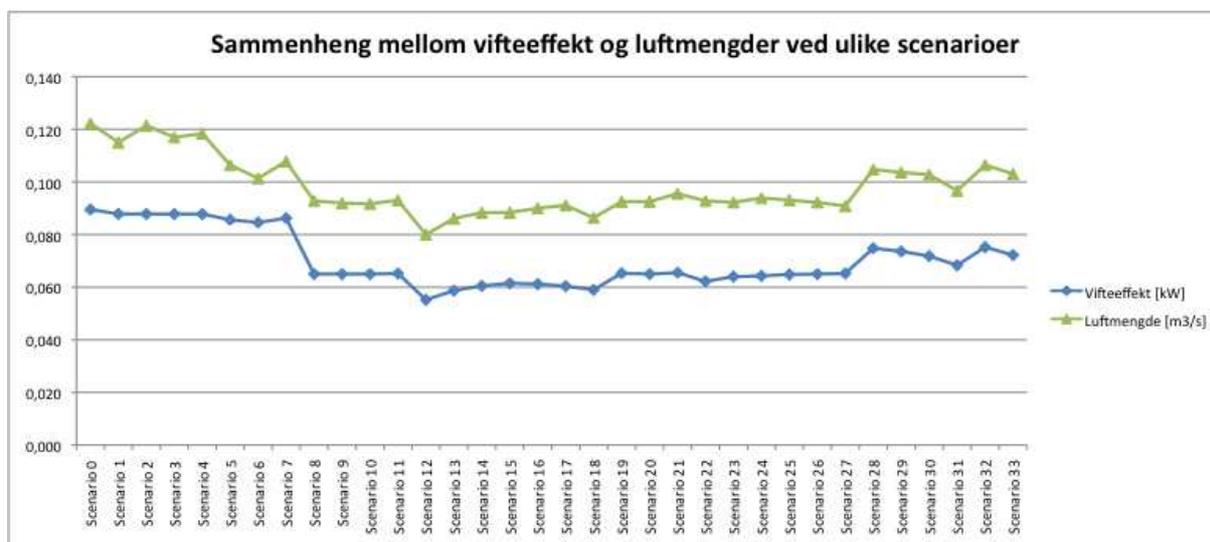
Figur 8-65. Diagrammet viser oversikt over vifteeffekt ved de ulike scenarioene. Verdiene er basert på bruk av effektanalysator koblet til frekvensomformer. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.



Figur 8-66. Diagrammet viser sammenhengen mellom vifteeffekt og frekvens ved de ulike scenarioene som innebærer justering av frekvens (Scenario 8-33). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Vifteeffekten varierer med turtallet til viften, som igjen styres av en frekvensomformer i dette tilfellet. Som Figur 8-66 viser, ble det påvist gjennom målinger at det var en sterk korrelasjon mellom frekvens og vifteeffekt. Ved å plote inn alle vifteeffektene og frekvensverdiene for hvert enkelt scenario i et diagram, for så å legge inn en regresjonskurve, ser man at forholdet mellom disse to verdiene følger hverandre eksponentielt.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



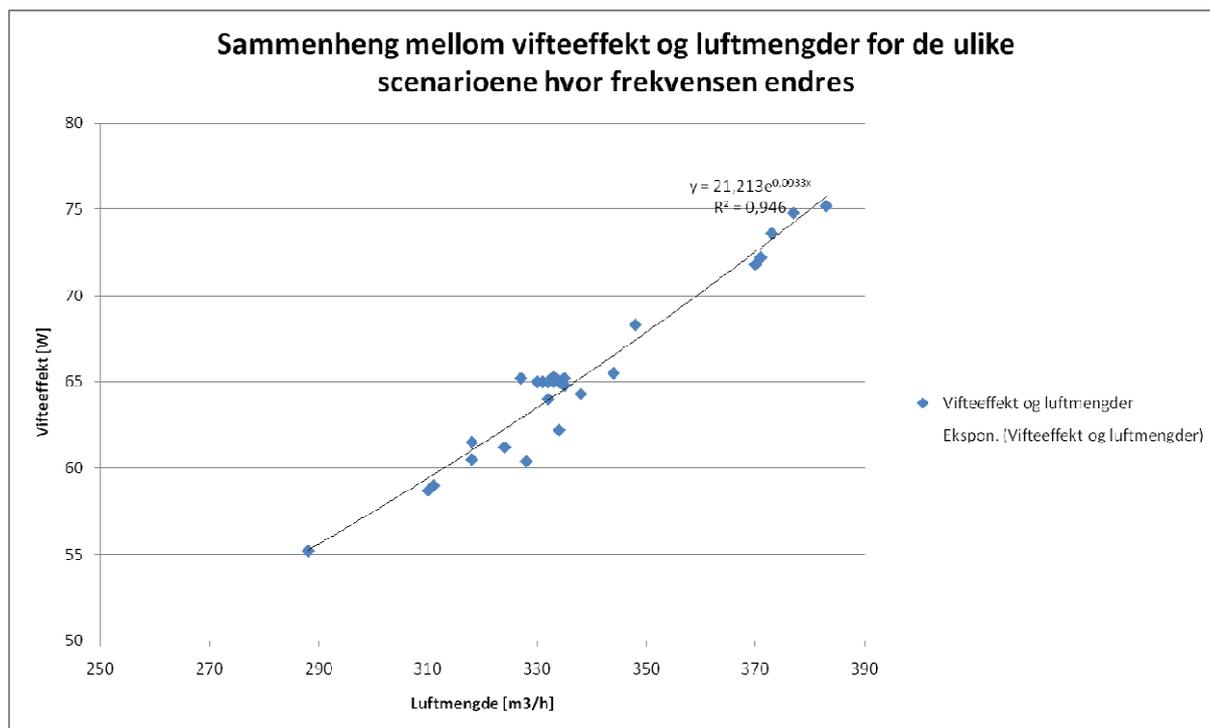
Figur 8-67. Diagrammet viser oversikt over vifteeffekt i forhold til luftmengde, ved de ulike scenarioene. Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Figur 8-67 viser at scenario 12 resulterte i den laveste vifteeffekten, samt den laveste luftmengden. Dog er det flere scenarier som har en lavere SFP-verdi, noe som betyr at scenarioet ikke er det mest energieffektive i forholdet mellom luftmengde og vifteeffekt, men likevel det scenarioet som har lavest energibehov med tanke på vifteeffekt alene. I dette scenarioet ble spjeldet i uttak 1 stengt, samtidig som sensorplasseringen var før uttak 1. For å evaluere resultatene for andre scenarier som også stengte uttak 1 er det laget en oversikt, se Tabell 8-6.

Tabell 8-6. Tabellen viser en oversikt over resultater for luftmengde og vifteeffekt fra scenarier hvor uttak 1 ble stengt, men som hadde ulik plassering av trykksensor. Tabellen er produsert i Microsoft Excel.

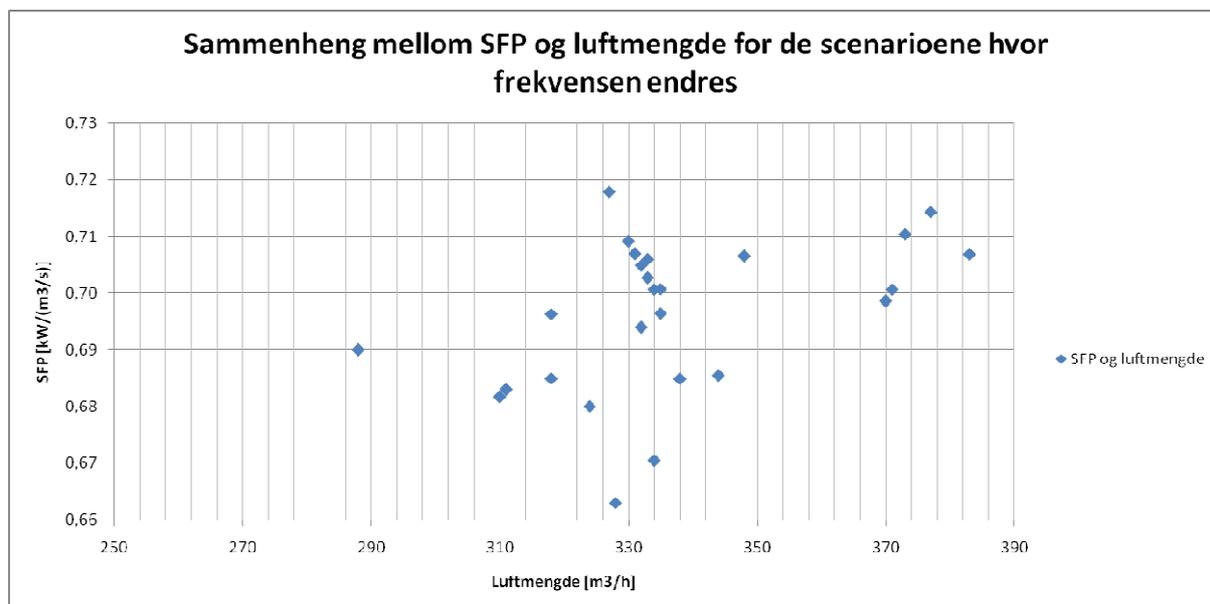
Scenario	Sensorplassering					Luftmengde målt [m ³ /h]	Luftmengde innregulert [m ³ /h]	Avvik	Vifteeffekt før [W]	Vifteeffekt etter [W]	Avvik
	1	2	3	4	5						
8					x	334	330	1 %	89,5	65	-38 %
9				x		331	330	0 %	89,5	65	-38 %
10			x			330	330	0 %	89,5	65	-38 %
11		x				335	330	1 %	89,5	65,2	-37 %
12	x					288	330	-15 %	89,5	55,2	-62 %
19		x				333	330	1 %	89,5	65,3	-37 %
20			x			333	330	1 %	89,5	65	-38 %
27					x	327	330	-1 %	89,5	65,2	-37 %

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp



Figur 8-68. Diagrammet viser oversikt over vifteeffekt i forhold til luftmengde, ved de ulike scenarioene som innebærer justering av frekvens (Scenario 8-33). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

Som Figur 8-68 viser, er det en noenlunde god korrelasjon mellom vifteeffekt og luftmengde. Det samme kan ikke sies om sammenhengen mellom SFP og luftmengde, noe som fremgår av Figur 8-69.



Figur 8-69. Diagrammet viser oversikt over SFP i forhold til luftmengde, ved de ulike scenarioene som innebærer justering av frekvens (Scenario 8-33). Diagrammet er produsert i Microsoft Excel.

8.8 Bedre behovsstyring med bedre beskrivelse og krav

Utviklingen av behovstilpasset ventilasjon går raskt og slike ventilasjonsanlegg blir en forutsetning for å tilfredsstille energikrav i fremtidige byggeforskrifter. Selv om det finnes gode eksempler på velfungerende behovsstyring og omfattende kompetanse innen området, er erfaringen hos mange at slike anlegg ikke fungerer som de skal, og at de ikke klarer å utnytte det fulle sparepotensialet som teorien tilsier.

På bakgrunn av dette ble det satt sammen en gruppe eksperter fra ventilasjons- og byggebransjen, som i samarbeid med denne rapportens forfattere har utarbeidet forslag til hvilke momenter og krav som må stilles for å oppnå velfungerende behovstilpassede ventilasjonsanlegg. Momenter som inneholder følgende anbefalinger:

- Anbefalte kravspesifikasjoner og beskrivelser av behovsstyrte ventilasjonsanlegg
- Anbefalte kontrollrutiner og kontrollpunkter ved overlevering av behovsstyrte ventilasjonsanlegg
- Anbefalte driftsrutiner for å opprettholde funksjonen til behovsstyrte ventilasjonsanlegg

Dette er forslag til krav gjeldende for nybygg og større rehabiliteringsprosjekter innen undervisningsbygg, men vil også kunne anvendes for andre typer bygningskategorier som planlegges med behovstilpasset ventilasjon.

Momentene og kravene ble utarbeidet på grunnlag av generelle vurderinger av løsninger, og det ble ikke gjennomført studier på eksisterende anlegg med identifisering av årsaker til funksjonsfeil og høyt energibehov.

Det ble fokusert på å stille krav som kan etterprøves på en slik måte at det ikke etterlater tvil om kravet er tilfredsstillt eller ikke. Eventuelle avvik bør kobles opp mot en på forhånd avtalt kompensasjonsberegning som gjelder begge veier. Altså ikke bare økonomisk erstatning ved feil og mangler, men også økonomisk belønning for gode anlegg som leverer bedre resultater enn de kravene som er satt. Dette vil sørge for at det er et konkurransefortrinn å levere systemer som fungerer optimalt. Man skal dog være oppmerksom på utfordringene ved avtaler om kompensasjonsberegning i forhold til fallgruver og forbehold som stilles. Uten klare ansvarsmatriser og med for mange forbehold fra ansvarlig utførende, kan slike avtaler ende opp med å være verdiløse. Det arbeides med en standard rundt slike energisparekontrakter som antas å være klar i løpet av 2012.

8.8.1 Kravspesifikasjon og beskrivelse – resultater og diskusjon

1. Krav til SFP ved definerte driftssituasjoner

TEK10 stiller krav til SFP-faktor på $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, men definerer ikke hvordan denne skal beregnes/måles eller hvilke forutsetninger som gjelder. TEK07 hadde i tillegg til et krav til SFP i driftstiden på $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, et krav utenfor driftstid på $1,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, men dette kravet har falt bort i den nye forskriften. Samtidig har TEK10 innført et krav om en frisklufttilførsel på minimum $0,7 (\text{m}^3/\text{h})/\text{m}^2$ når rommene ikke er i bruk. Det stilles spørsmålstegn ved om det ikke bør innføres et krav til SFP i forbindelse med

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

dette, på bakgrunn av at man med såpass lave luftmengder i mange tilfeller må presse aggregatene til å operere på kunstig lave og ugunstige driftspunkt, og dermed risikerer å få anlegg som er lite energieffektive i store deler av døgnet. Det opprinnelige kravet på $1,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ er realistisk for boenheter, hvor $0,7 (\text{m}^3/\text{h})/\text{m}^2$ er 58 % av minimumskravet på $1,2 (\text{m}^3/\text{h})/\text{m}^2$ (TEK10), men ikke realistisk i for eksempel undervisningsbygg, hvor $0,7 (\text{m}^3/\text{h})/\text{m}^2$ er 5,6 % av typisk dimensjonerende forhold på $12,5 (\text{m}^3/\text{h})/\text{m}^2$. Spjeld og viftemotorer er ikke designet for å regulere så langt ned, så det å sette krav til SFP ved slike ekstreme driftsscenarioer vil ikke være aktuelt. Videre i dette dokumentet vil det derfor fokuseres på krav til SFP ved mer realistisk definerte driftsscenarioer gjeldende for undervisningsbygg.

I følge NS 3031:2007, som benyttes for å dokumentere bygningers energiytelse, skal SFP beregnes for det aktuelle luftbehandlingsanlegget under normal drift (tillegg H). Standarden definerer ikke hva som er normal drift, men det antas at det i dette tilfellet er snakk om de luftmengder og temperaturer som gjelder ved dimensjonerende forhold. Det bør i revidert utgave av standarden defineres hva som menes med luftbehandlingsanlegg, i forhold til om det er snakk om et enkelt aggregat eller samtlige aggregater i ett bygg samlet, i tillegg til at normal drift bør utdypes.

I dette skrevet defineres SFP som spesifikk viftekapasitet for det aktuelle luftbehandlingsaggregatet, i annen litteratur beskrevet som SFP_{AHU} , i henhold til EN 13779:2007 (Annex D):

$$SFP_E = \frac{P_{sfm} + P_{efm}}{q_{max}} [\text{kW} / (\text{m}^3 / \text{s})]$$

hvor P_{sfm} er effekt til tilluftsviften og P_{efm} er effekt til avtrekksviften. q_{max} er den største luftmengden av tilluft og avtrekk.

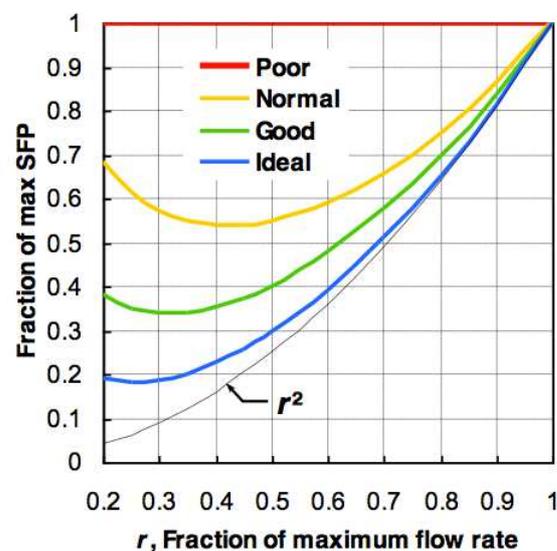
Det anbefales å sette krav til SFP-faktor til hvert enkelt aggregat, ved to definerte driftsscenarioer innenfor den normale driftstiden. Det ene kravet skal gjelde for dimensjonerende forhold (og da gjenspeiler kravet i TEK10) og det andre for redusert drift.

Bakgrunnen for dette kravet er at man skal ha kontroll på energieffektiviteten i anlegget ved flere driftsenarioer. Dette vil bidra til at anleggene må reguleres optimalt ved både høye og lave luftmengder. Kravet til SFP for redusert drift tallfestes ikke i dette skrevet, men vil være den ansvarliges oppgave å definere for de aktuelle prosjektene med tanke på reguleringsprinsipp, design osv. Det kunne vært aktuelt å stille krav til SFP i forhold til kun å angi andel av maksimal luftmengde, men i forhold til etterprøvnbarhet og dokumentasjon kan det bli vanskelig med tanke på de mange ulike innstillingene som kan gjøres for å redusere luftmengden til ønsket verdi. Det er derfor viktig at driftsscenarioet defineres for hvilke rom som skal reguleres ned til minimumsluftmengde og eventuelt hvilke som skal ha dimensjonerende forhold, slik at man får dokumentert fremgangsmåten for å oppnå ønsket andel av maksimal luftmengde.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Ved å stille krav til SFP ved definerte driftsscenarioer, og ikke som et gjennomsnitt over driftstiden, unngår man også muligheten for å manipulere seg frem til lavere SFP-verdi ved for eksempel å forlenge driftstiden utenfor normal tilstedeværelse/oppholdstid, for dermed å kjøre luftbehandlingsanleggene på redusert kapasitet, eller redusere pådraget på avtrekksviften.

Figur 8-70 viser variasjonen av SFP i forhold til luftmengder for de mest vanlige reguleringsprinsippene innen behovstilpasset ventilasjon, og vil kunne gi en indikasjon på hvilke krav man bør stille til de ulike systemene. For trykkstyrte anlegg med optimizer-funksjon (innlesing av spjeldposisjon) kan det eksempelvis settes krav til at SFP-faktoren skal reduseres til 35 % når luftmengden er redusert til 40 % i forhold til maksimal verdi.



Figur 8-70. Grafen viser sammenhengen mellom SFP og luftmengder (Grini, 2010).

Poor: Systemer med dårlig effektivitet ved redusert drift. Representerer utgåtte metoder, samt VAV-systemer hvor konstant vifte trykk opprettholdes ved å kontrollere viftehastighet, uten tanke på luftmengder.

Normal: Representerer VAV-systemer med vanlig trykkregulering, hvor viften turtallsreguleres i forhold til å holde et konstant statisk trykk der trykksensoren er plassert.

Good: Representerer VAV-systemer med "optimizer"-funksjon, hvor en "static pressure reset" (SPR) jobber for å minimere trykkmotstanden i kanalnettet ved å alltid holde et spjeld maksimalt åpent.

Ideal: Representerer perfekte "optimizer"-anlegg, hvor trykket faller optimalt i forhold til lave luftmengder. Dvs. at man har fullt åpent (100 %) spjeld ved kritisk vei.

Kravene skal være etterprøvbare ved hjelp av vifteeffekt- og luftmengdemålinger, slik at SFP kan beregnes. Måling av vifteeffekt skal utføres slik at alle vifteenergi-relevante tapsledd inngår i effektmålingen, for eksempel på strømkursene inn på

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

trafo/styringstavle/frekvensomformer. Relevante tap i denne forbindelse er tap ved turtallsregulering, motor, kraftoverføring mellom motor og vifte, og tap i viften. Netto luftmengder og luftfordeling ved SFP-kontroll, må entydig beskrives på rom- eller sonenivå og leses av på SD-anlegget. Dette vil også være et incitament for å bygge ventilasjonsanlegg med liten luftlekkasje.

2. Robuste anlegg

For å sikre god funksjon og drift av behovstilpassede ventilasjonsanlegg, er det viktig at anleggene er robuste. I dette tilfellet er det snakk om ventilasjonsanlegg, som opprettholder stabil funksjon over tid i alle driftssituasjoner, utsatt for normale påkjenninger. For eksempel må sensorer og reguleringsorganer tåle betydelig eksponering for støv når de er plassert i avtrekkskanaler eller i luftinntaket før filter. Ventilasjonsanlegget må være robust i alle ledd, og det bør rettes fokus mot de svakeste leddene, slik som trykk-, mengde- og inneklimasensorer, samt motorspjeld. Mer om krav til komponenter senere i dokumentet. For undervisningsbygg snakker vi også om evnen til å motstå ytre påkjenninger fra nysgjerrige elever, herunder vandalsikring og minimale muligheter for å påvirke ventilasjonsanlegget gjennom å justere på ventiler, sensorer, spjeld osv.

Målenøyaktighet og -usikkerhet må knyttes opp mot reguleringsområdet slik at man alltid sikrer stabil drift med minimal energibruk i henhold til intensjonen. Driftssituasjoner hvor viften øker pådraget selv om luftmengdebehovene i alle sonene er tilfredsstilt, må unngås.

Kritiske ytelser som luftmengder er normalt å anse som minimumsverdier som skal tilfredsstilles. Måleusikkerhet knyttet til sensorer og/eller VAV-spjeld må hensyntas på en slik måte at minimumskravene alltid er tilfredsstilt.

”Stresstest”:

For å sikre og dokumentere at anlegget er robust og fungerer som det er tiltenkt, skal det utsettes for en såkalt *stresstest*. Dette innebærer at anlegget blir tvunget til å utsettes for “worst-case”-lignende scenarioer, for så å registrere hvordan anlegget responderer på disse, samt analysere resultatene. For lettere å gjennomføre en slik stresstest må det være mulig å styre/manipulere og logge de aktuelle måleverdiene gjennom SD-anlegget. Det vil si trykk, luftmengder på rom- eller sonenivå, samt eventuelt CO₂-konsentrasjon, temperatur og/eller tilstedeværelse.

Momenter som kan inngå i en stresstest er:

- Tvangsstenge og åpne ulike spjeld i anlegget, og undersøke luftmengdefordelingen til de aktuelle sonene/rommene som anlegget forsyner, før og etter. Luftmengdene sammenliknes mot minstekrav og dimensjonerende forhold. På denne måten får man dokumentasjon på om anlegget girer ned til minimumsluftmengder, slik intensjonen er.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

- Kontrollere at endringer i luftmengder på romnivå også gir tilsvarende endringer sentralt i anlegget. Avvik rundt dette kan avdekke blant annet ugunstig plassering av trykksensor i forhold til nøyaktighet og sensitivitet og/eller betydelige luftlekkasjer.
- Kontrollere at SFP-verdien reduseres ved redusert pådrag.

Det skal på forhånd defineres et område, som resultatene av denne testen skal ligge innenfor for å kunne oppfylle kravet om robusthet. Kravene til tillatt avvik skal stilles i forhold til hvor presise komponentene i anlegget er. Jo mer upresise komponenter, jo større avvik må tillates. Dette er et punkt som vil belyse konsekvensen av å benytte upresise komponenter, da større tillatt avvik kan føre til høyere luftmengder enn hva som er nødvendig, og dermed også større energibruk enn nødvendig.

For å tallfeste resultatene av en slik test, kan det også tenkes å innføre en skala fra 0 til 10 for hvert enkelt moment, hvor det endelige resultatet som definerer kravet er et produkt av resultatene fra hvert enkelt moment og deres vektning, matematisk uttrykket slik:

$$\sum \text{vektning}_i \times \text{delresultat}_i$$

Tabell 8-7. Tabellen viser et eksempel på hvordan ulike momenter kan vektet og summeres for å tallfeste et krav.

Moment	Vekting (0-10)	Delresultat (0-10)	Delsum (vektning x delresultat)
1	10	8	80
2	8	6	53
3	6	10	60
TOTALSUM			193

I eksempelet over stilles det da et krav til en totalsum som skal tilfredsstilles. Eventuelt kan man innføre en variant hvor det stilles krav til selve delresultatene i forhold til deres vektning, hvor det stilles høye krav ved vektning over 8, og lavere krav ved lavere vektning. I motsetning til det å sette krav til totalsum, hvor kravet kan tilfredsstilles ved bra score på momenter ved lav vektning, vil det i dette tilfelle sikre at momenter som har høy vektning må ha høy score, slik at de viktigste prosessene/komponentene i anlegget er på topp nivå.

3. Ansvars plassering

Noe av det viktigste i en byggeprosess i forhold til å sikre gode og funksjonelle anlegg, er å plassere ansvar og eierskap. Håndheving av dagens TEK er tydelig på ansvars plassering, men har vist seg helt ute av stand til å ansvarliggjøre aktører ved avvik, i form av manglende stikkprøver. Ansvar i plan- og bygningslovens forstand innebærer også bare at foretaket skal innestå direkte overfor bygningsmyndighetene i

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

forhold til at kravene i lov og forskrift skal oppfylles med tanke på formelle og materielle krav, men sier ikke noe om funksjonsansvar og/eller systemansvar.

Det er viktig å plassere ansvaret på én aktør, slik at ikke alle skylder på alle og avvik og ugunstige forhold ikke blir utbedret. Den aktuelle aktøren må få kompensasjon, både økonomisk og tidsmessig, for å bli tiltransportert ansvarsoppgaven. En standard som vil lette kommunikasjonen mellom, og koordineringen av aktørene, er NS 3935:2005 - "ITB – Integrerte tekniske bygningsinstallasjoner – Prosjektering, utførelse og idriftsettelse". For å sikre god funksjon, kan følgende tre ansvarsmodeller benyttes:

Energy Performance Contracting - EPC

Et virkemiddel som kan sørge for velfungerende anlegg, er å kontraktfeste energibesparelsen et behovstilpasset ventilasjonsanlegg er beregnet å gi.

- Hovedentreprenør eller annen ansvarlig instans tar ansvar for et komplett og funksjonelt anlegg.
- Forhåndsavtalt økonomisk konsekvens for den ansvarlige ved eventuelle avvik fra krav, for eksempel relatert til energibruk gjennom driftstiden eller over året. Erstatning ved feil og mangler, og belønning for gode anlegg som leverer bedre resultater enn de kravene som er satt.
- Det er viktig at en eventuell energibesparelse ikke går på bekostning av inneklimate, komfort hos brukerne må ligge som en betingelse.
- Man må være oppmerksom på eventuelle fallgruver i slike avtaler, spesielt med tanke på den ansvarliges krav til drift, vedlikehold og andre forbehold. For mange forbehold og krav kan innebære utfordringer for byggeier og/eller driftsorganisasjon.
- Det arbeides med en standard for energisparekontrakter som sannsynligvis vil være klar i 2012.

Funksjonsleveranse

Funksjonsleveranse handler om at den ansvarlige garanterer for et komplett og funksjonelt anlegg i henhold til spesifikasjonene om hva anlegget skal levere og hvordan det skal operere.

Funksjonsleveranse legges under automatikk- eller ventilasjonsentreprenør, avhengig av kompleksitet og anleggets utforming etc. Erfaring viser at det som oftest vil være mest fordelaktig å plassere ansvaret under ventilasjonsentreprenør, på bakgrunn av forståelse og kompetanse.

Ved ansvarsfordeling er det viktig å stille krav til kompetanse og referansebygg for å sikre forståelsen og kompleksiteten av det behovstilpassede anlegget.

Den som blir tildelt ansvaret for fullstendig funksjonsleveranse, skal også få tiltransportert ansvaret for alle underleveranser i forbindelse med leveransen, slik at den ansvarlige har det fulle og hele ansvaret for komplett funksjon, men skal også få kompensasjon i form av økonomi og tidsbruk for dette arbeidet.

Det er viktig at den ansvarlige blir en del av prosjektet i tidlig fase.

Systemleveranse

Systemleveranse ligner mye på funksjonsleveranse, men i dette tilfelle opererer man på komponentnivå og legger ansvaret på at alle komponenter fungerer i henhold til intensjon og krav.

4. Kommunikasjon/grensesnittmatrise

For å kunne kontrollere, optimalisere og kvalitetssikre funksjonen og driften av det behovstilpassede ventilasjonsanlegget er det vesentlig med et velfungerende SD-anlegg. Et godt SD-anlegg må ha følgende muligheter:

- Det skal være mulighet for å logge de aktuelle reguleringsparameterne (CO₂, temperatur, aktivitet, VOC etc.), samt luftmengde og spjeldposisjon på sone- eller romnivå hvis mulig (skal- og er-verdier)
- Mulighet for å justere settpunkt for hver enkelt sensor i forhold til brukeren
- Det skal opprettes en webside som gjør det enkelt å fjernovervåke og kontrollere anlegget til enhver tid. Hva som skal fjernovervåkes og logges må defineres og bestilles på forhånd, så dette ikke fremkommer som et fordyrende tillegg senere i prosjektet.
 - Vil dermed ha mulighet til å avdekke målefeil/sensorfeil
 - Mulighet for å logge inneklimaparametre, som kan hentes frem ved eventuelle klager eller rutinekontroller, samt følge opp energibruket til ventilasjonsanlegget.
- For å beregne og tallfeste årlig gjennomsnittlig SFP-faktor må SD-anlegget ha mulighet for å hente ut luftmengder og totalt trykktap for de forskjellige driftsituasjonene.
 - Beregning av årlig gjennomsnittlig SFP-faktor beregnes i henhold til

$$\overline{SFP}_e = \frac{\sum_{i=1}^N (\Sigma P_i \Delta t_i)}{\sum_{i=1}^N (q_{v,i} \Delta t_i)} = \frac{\sum_{i=1}^N (SFP_{e,i} q_{v,i} \Delta t_i)}{\sum_{i=1}^N (q_{v,i} \Delta t_i)}$$

formel:

- Hvor N er antall forskjellige driftscenarioer og Δt_i er varigheten på disse.

ANBUDBESKRIVELSE

1. Krav til kombinerte temperatur- og CO₂-sensorer

- Regulering
 - Det skal installeres en CO₂-sensor på egnet sted (for eksempel på yttervegg i nærheten av inntaksrist), som registrerer konsentrasjonen i uteluften, og minst én i det aktuelle rommet som registrerer konsentrasjonen i oppholdssonen.
 - Luftmengden skal reguleres etter differansen mellom disse to konsentrasjonene, og ikke kun etter en antatt uteluftkonsentrasjon, slik det vanligvis blir gjort. Ved å registrere de faktiske forhold av CO₂-konsentrasjonen i uteluften, vil man kunne eliminere muligheten for over- eller underventilering som følge av misvisende antagelser. Overventilering vil medføre unødvendige energikostnader, mens underventilering kan føre til dårligere inn klima.
- Plassering
 - Rådgiver til det aktuelle prosjektet skal komme med konkret plassering i hvert enkelt rom i forhold til fastbestemt møbleringsplan. Det skal være enkelt å justere plassering i forhold til ommøblering og ombygging.
 - Skal ikke plasseres i nærheten av:
 - Dører
 - Yttervegg, eller på yttervegg
 - Tilluftsventiler
 - Varmekilder
 - Direkte solstråling
 - Skal plasseres
 - Monteres vertikalt med god luftstrømning rundt sensoren
 - 0,9-1,8 m over gulv avhengig av tenkt aktivitet i rommet (i pustehøyde), og mest mulig sentralt i forhold til oppholdssone
 - Minst 0,6 m fra der mennesker puster og utånder CO₂
 - Kan plasseres i nærheten av avtrekksventiler
 - Plassering av sensor har større betydning enn lav måleusikkerhet
- Maksimal måleusikkerhet CO₂-sensorer
 - Usikkerhet for hele registreringsskalaen (eks. 0-2000 ppm)
 - Eks. +/- 50 ppm
 - Usikkerhet i arbeidsområdet (eks. 300 – 1200 ppm)
 - Eks. +/- 30 ppm
- Maksimal måleusikkerhet temperatursensorer
 - Usikkerhet for hele registreringsskalaen (eks. 0 – 40 °C)
 - ±0,5 °C

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

- Kalibrering
 - Kontroll av CO₂-sensorer over SD-anlegget før bygget er tatt i bruk, for å avdekke eventuelle unaturlige avvik og sensorfeil. CO₂-sensorer kan testes ved hjelp av gass på flaske eller pose med gitte konsentrasjoner.
 - Skal ha faste og pålitelige kontrollrutiner
 - Rutinemessig fysisk sjekk i forhold til støv etc.
 - Alt av utstyr skal være fabrikkkalibrert og det skal utføres stikkprøvekalibrering, da fabrikkkalibrering ikke nødvendigvis er korrekt.
 - Stikkprøver ved ettårskontroll
- Sensoren må være holdbar overfor de kjemiske, mekaniske og termiske påvirkningene den blir utsatt for, og den skal være selektiv i forhold til at den ikke reagerer på uvedkommende gasser.
- Når det gjelder utetemperaturføler er det viktig å ikke glemme og ta hensyn til effekten av solstråling direkte og stråling fra oppvarmede, omkringliggende flater.
- Nattkontroll av måleusikkerhet for CO₂-sensorer
 - Ved mistanke om for stort avvik så kjøres ventilasjonsanlegget når bygget ikke er i bruk inntil alle CO₂-sensorene viser stabil verdi. Målte verdier skal da representere uteluftnivå og være tilnærmet like. Hvis det registrerte avviket tilsier større måleusikkerhet enn kravet så må enten sensorene byttes ut, eller luftmengden økes slik at minimumsluftmengde med sikkerhet tilføres selv om måleusikkerheten er større enn opprinnelig forutsatt. Økt energikostnad som følge av økte luftmengder kan beregnes over normal levetid for sensorene (de fleste oppgir 15 år) og danne grunnlag for erstatningskrav mot sensorleverandør. Det er innledningsvis viktig å stille gode krav til måleusikkerhet ved uteluftnivå (inkludert kontrollområde for temperatur og RH), for å kunne foreta en rimelig, enkel og relativt sikker kontroll.

2. Krav til VAV-spjeld

- SD-anlegget skal ha mulighet til å undersøke posisjonen til samtlige sonespjeld → optimalisere ventilasjonsaggregatets trykk slik at minst ett sonespjeld er maksimalt åpen i forhold til reguleringsfunksjon.
- Måleusikkerhet både ved normal- og nominell luftmengde (10-15 %?)
- Skal ha tilstrekkelig autoritet. Dette kan også sees i sammenheng med krav til maksimal måleusikkerhet (som naturlig nok øker med redusert autoritet)
- Plassering
- Undersøkelser viser at stor del av klagen i bygg er i forbindelse med støy fra VAV-terminaler. Det er essensielt å velge korrekt dimensjon på disse i forhold til tiltenkt arbeidsområde. Å velge for store dimensjoner med tanke på lavere støyproduksjon som følge av lavere trykktap er ingen god idé, da terminalen kan ha problemer med å regulere ned til ønsket minimumsluftmengde.

3. Krav til trykksensor

Trykksensorer må velges ut i fra arbeidsområde. Plasseringen er veldig viktig, og skal angis av eventuell rådgiver i prosjektet. Manuelle trykkmålinger bør utføres der plassering er tiltenkt, for å avdekke eventuelle trykkpulseringer eller ugunstige strømningsforhold. Dette må utføres etter at anlegget er igangkjørt og under normale driftsforhold.

8.8.2 Overlevering - Kontroll- og driftsrutiner

En viktig del av overleveringsdokumentene er ventilasjonsanleggets innreguleringsprotokoll. Disse skal dokumentere at målte luftmengder ikke innehar for store avvik i forhold til de prosjekterte verdiene. Dagens praksis innebærer ofte bruk av gamle innreguleringsprotokoller tilpasset konstante ventilasjonsluftmengder (CAV). For behovstilpassede anlegg er det viktig å tilpasse innreguleringsprotokollene for denne type regulering. Det vil si at man ikke bare innregulerer anlegget ved dimensjonerende forhold, og lar automatikken "ordne resten", men også innregulerer ved minimumsluftmengder.

Ansvarlig entreprenør skal gjennomføre funksjonskontroll av anlegget i flere faser:

- Før overlevering
- Ved ettårskontroll
- Kort tid før reklamasjonstiden er over, for eksempel etter fire år (Det er i plan- og bygningsloven § 23-3 annet ledd innført en ny regel som går ut på at kommunen kan gi pålegg om retting til den ansvarlige i fem år etter at ferdigattest er gitt)
- Hvis ansvarlig entreprenør også er ansvarlig for drift, skal det også igangsettes kontinuerlig funksjonskontroll/overvåking gjennom SD-anlegget.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

For behovstilpassede ventilasjonsanlegg skal en funksjonskontroll innebære følgende:

- Stikkprøver av komponenter i anlegget både ved overlevering og ved ettårskontroll, for å analysere anlegget. Sentrale parametere logges gjennom det første driftsåret, som bakgrunnsmateriale for å analysere anlegget ved senere kontroll. Når det gjelder stikkprøver kan antall stikkprøver i forhold til anlegget størrelse angis i forhold til det som er angitt i Tillegg D i NS-EN 12599:2000. Det må avklares på forhånd hvem som skal utføre de aktuelle stikkprøvene (drift/entreprenør/leverandør). NS-EN 12599:2000 med kommende oppdatering.
- Det bør utføres manuelle målinger for registrering av trykktap i strategiske punkter ved overlevering, og leveres som en del av norskspråklige FDV-dokumentasjonen.
 - Disse måledataene kan benyttes for å undersøke de opprinnelige forholdene ved gjennomføring av for eksempel ettårskontroll eller andre situasjoner.

Før funksjonskontroll startes skal det gjennomføres forberedende arbeider iht. tillegg B i NS-EN 12599:2000.

Den aktuelle standarden angir ikke metode for å se på sammenhengen mellom luftmengderegulering av viften og faktisk endring av luftmengder i på sone-/romnivå.

8.9 Måleusikkerhet

Det er generelt sett knyttet usikkerhet til alle typer målinger som blir gjennomført. For å kunne validere resultatene fra de aktuelle målingene, og dermed trekke godt begrunnede konklusjoner, er det essensielt å kjenne til usikkerheten. Måleusikkerhet og målefeil er to uttrykk som benyttes i denne sammenheng. Målefeil er avviket mellom målt og sann verdi for en enkeltmåling. I realiteten er ikke den sanne verdien kjent, da ingen instrumenter måler helt eksakt, og det blir derfor vanskelig å beregne en eksakt målefeil. På bakgrunn av dette, benyttes heller begrepet måleusikkerhet. Måleusikkerhet kan deles inn i systematiske (U_s) og tilfeldige (U_t) usikkerheter (Hansen, H.E. et al., 1997), som summert gir den resulterende usikkerheten (U_r):

$$U_r = \pm \sqrt{U_t^2 + U_s^2}$$

Systematiske usikkerheter er et uttrykk for avviket mellom middelveien av et gitt antall målinger utført under likeverdige betingelser og den sanne verdien. En systematisk feil vil gi et avvik hver gang vi måler, men ved å innlemme disse avvikene i måledataen, kan målefeilene i utgangspunktet elimineres. I forhold til at systematiske feil gir ett bestemt avvik for alle målinger, kan ikke denne usikkerheten reduseres, og er da ofte oppgitt som en prosentvis feil.

Den tilfeldige feilen henviser til avviket mellom en enkeltmåling og et stort antall målinger av den samme størrelsen, under ensartede betingelser. Det kan være et konstant avvik, eller det kan variere på en systematisk måte. Det viser seg nemlig at gjentakende målinger av den samme parameteren kan variere, selv om forholdene og betingelsene er de samme. For å ta høyde for den tilfeldige feilen, bør det beregnes ett gjennomsnitt av flere målinger.

Både systematiske og tilfeldige usikkerheter kan inndeles i:

- Instrumentusikkerhet, U_i
- Metodeusikkerhet, U_m
- Avlesningsusikkerhet, U_a

Gitt at de systematiske usikkerhetene er tatt høyde for, blir da den totale usikkerheten følgende:

$$U_{tot} = \pm \sqrt{U_i^2 + U_m^2 + U_a^2}$$

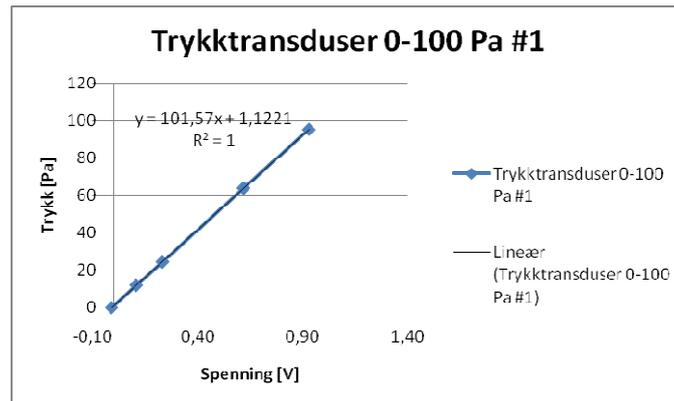
For målingene i denne rapporten er det forsøkt å redusere både den systematiske og den totale måleusikkerheten til et minimum. Videre presenteres måleusikkerhetene for de parameterne som ble målt og det utstyret som ble benyttet.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

8.9.1 Logging av statisk trykk

Logging av statisk trykk ble utført ved hjelp av trykktransducere (Furness Controls Limited, FCO 44). For å eliminere den systematiske usikkerheten, ble utstyret kalibrert ved hjelp av et referanseinstrument (Furness FC0510 Micromanometer) med svært lav måleusikkerhet ($\pm 0,1$ %). Selve trykktransduserne har en oppgitt måleusikkerhet på $\pm 0,2$ %.

For alle trykktransducere ble det laget en kalibreringskurve som var unik for hvert enkelt. Figur 8-71 viser kalibreringskurven for én av trykktransduserne.



Figur 8-71. Figuren viser kalibreringskurve for en trykktransduser.

For denne kalibreringskurven ligger alle målepunktene lineært i forhold til hverandre. Tilfeldige usikkerheter er dermed med stor sannsynlighet eliminert, i tillegg til at kalibreringen til en viss grad eliminerer den systematiske usikkerheten. Da verdiene fra loggingen ved hjelp av trykktransducere ble importert direkte inn i en datalogger, kan det også med god grunn ses bort ifra avlesningsusikkerhet også.

At den systematiske usikkerheten ikke elimineres i sin helhet, skyldes det faktum at det atmosfæriske trykket varierte underveis i loggeprosessen. Kalibreringsprosedyren skjer ved at trykktransduseren registrerer et differansetrykk mellom et referanseinstrument (Furness Micromanometer) og et atmosfærisk trykk. Når det atmosfæriske trykket endrer seg, vil også kalibreringskurven bli noe feil. For å minimere dette avviket, ble trykktransduserne koblet til en trykksylinder som holdt konstant atmosfærisk trykk, slik det er beskrevet i metodekapittelet.

Ved hjelp av både kalibrering i forhold til et meget nøyaktig referanseinstrument, samt tiltak som trykksylinder, er det dermed god grunn til å påstå at verdiene fra disse trykkloggingene er pålitelige og gode.

8.9.2 Manuell måling av statisk trykk

Manuell måling av statisk trykk ble foretatt med pitotrør koblet til et micromanometer (Furness). Pitotrør er et velegnet for å måle både totaltrykk og statisk trykk, da det er robust og ikke stiller krav til kalibrering. Pitotrør har en måleusikkerhet på $\pm 1-5\%$ (Hansen, H.E. et al., 1997). For å redusere usikkerheten ytterligere, ble det lagt vekt på registrere gjennomsnittsverdier fra Micromanometeret. I tillegg ble det, som beskrevet i metodekapittelet lagt stor vekt på korrekt og lik plassering av pitotrør for hver enkelt måling. Avlesningsfeil i denne metoden er så godt som eliminert, da instrumentpanelet er digitalt, men micromanometeret har som beskrevet en måleusikkerhet på $\pm 0,1\%$. Den totale måleusikkerheten for manuell måling av statisk trykk er dermed beregnet til følgende for "worst case":

$$U_{tot} = \pm\sqrt{0,1^2 + 5^2} = \pm 5\%$$

For målepunkt med lavere hastighet enn 3 m/s kan måleusikkerheten dog være noe høyere.

8.9.3 Luftmengdemåling i uttak

Luftmengdemåling i uttakene ble foretatt ved hjelp av måletrakt (Alnor AM-600 – GGA 45) og anemometer (DANTEC 54N60 Flowmaster – precision anemometer), med oppgitte måleusikkerheter på henholdsvis $\pm 10\%$ og $\pm 2\%$. Den totale måleusikkerheten for luftmengdemåling i uttak er dermed beregnet til:

$$U_{tot} = \pm\sqrt{2^2 + 10^2} = \pm 10,2\%$$

For å minimere usikkerheten for disse målingene, ble det også foretatt ulike tiltak. Et av tiltakene var å markere en sirkel for plassering av måletrakt, slik at denne ble lik for hver måling. Figur 7-10 viser bildet av dette. I tillegg ble det registrert gjennomsnittsverdier for lufthastigheter under avlesning av anemometeret. Termiske anemometre er også meget følsomme for hvilken retning føleren har i forhold til luftstrømmen. Føleren ble for alle målinger kontrollert at det var rettet vinkelrett mot luftstrømmen, samt at den var plassert i senter av måletrakten.

8.9.4 Luftmengdemåling for hovedluftmengde

For luftmengdemåling av hovedluftmengde før viften, ble det installert en måleblende (Fläkt EHBA-016-1) og tilkoblet en differansetrykkmåler (Furness Controls Limited – Digital Manometer FC016). Måleblende har en oppgitt usikkerhet på $\pm 5\%$ og differansetrykkmåleren $\pm 1\%$. Ved avlesning av verdier for differansetrykkmåleren, ble det beregnet snittverdien for disse. Den totale måleusikkerheten for luftmengdemåling med måleblende er dermed beregnet til:

$$U_{tot} = \pm\sqrt{5^2 + 1^2} = \pm 5,1\%$$

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

Det stemmer også godt overens med verdiene som ble presentert i resultatkapittelet angående avvik mellom totalluftmengde målt på bakgrunn av måleblende kontra hastighetsmåling i uttakene.

8.9.5 Effektmåling

Overvåking av viften effektforbruk ved ulike scenarioer ble målt ved hjelp av en effektanalysator (Norma D5255S - A/C Power analyzer). Apparatet har en meget liten usikkerhet, spesielt hvis den er forbundet med jord (noe den også var under målingene), og er oppgitt til $\pm 0,25$ % i litteraturen (kilde). Også her ble det foretatt flere avlesninger for så å beregne en gjennomsnittlig verdi, for å minimere avlesningsusikkerheten.

8.9.6 Barometertrykk

Avlesning av barometertrykk, for å bestemme det atmosfæriske trykket i trykksylinderen, ble utført ved hjelp av et digitalt barometer (Mensor Digital Pressure Gauge Modell 2104 SN 530990). Måleusikkerheten er oppgitt til ± 1 %, en relativ lav usikkerhet.

8.9.7 Måleusikkerhet i resultatene

I dette kapittelet er det presentert de ulike måleusikkerhetene som kan knyttes til de ulike målingene som ble gjennomført i forbindelse med rapporten. Det skal dog gjøres oppmerksom på at de beregnede måleusikkerhetene ikke er tatt høyde for i resultatene, og alle verdier er derfor gjeldende når usikkerheten ikke er tatt høyde for.

9 Diskusjon

Mens diskusjonen for de enkelte resultatene presenteres sammen med selve resultatene, vil det i dette kapitlet bli redegjort for generelle betraktninger og tolkninger innenfor de ulike temaene i oppgaven.

9.1 Litteraturstudie

Litteraturstudiet som er utført for bakgrunnsdelen dekker en bred tilnærming innenfor luftmengder og konsekvensene for helse, komfort og produktivitet. Det er fortsatt usikkerheter rundt hvilke konsentrasjoner av de ulike inneklimatestene som fører til de ulike SBS-relaterte symptomene. Det er heller ikke klart hvor stor del den psykososiale faktoren som spiller inn i det hele. Dette er ting det forskes videre på i håp om å få økt kunnskap. Uansett er det ingen tvil om at ventilasjon spiller en stor rolle for brukernes helse, og på bakgrunn av de studiene som er dekket i denne rapporten, kan det med god grunn slås fast at anbefalte minimumsluftmengder ikke bør overprøves i energieffektivitetens navn.

Det vil være veldig viktig i tiden fremover å se på konsekvensene for inneklimatest i forbindelse med de nye kravene til tetthet i bygg (passivhus). Ventilasjonens rolle vil sannsynligvis bli enda viktigere, men denne rapporten omtaler ikke eventuell forskning som er utført rundt dette. Studier som ser på konsekvensene for inneklimatest, tette bygningskonstruksjoner og nødvendig ventilasjon vil være et viktig satsingsområde.

I forbindelse med litteraturstudiet rundt reguleringsprinsipper innenfor behovstilpasset ventilasjon, finnes det en del kunnskap rundt de ulike prinsippene og hvilke fordeler og ulemper de er forbundet med. Det finnes derimot lite forskning rundt de faktiske forhold med tanke på virkelig energireduksjon og erfaringer i praksis. Da slike systemer er forbundet med en del problemer i praksis, ville det vært av stor nytte å forske mer på årsakene og omfanget av dette.

9.2 Målinger av luftmengdefordeling

På bakgrunn av mange målinger for luftmengdefordeling (34 ulike scenarioer), virker det legitimt å kunne trekke noen generelle slutninger. Foruten noen spesifikke scenarioer, oppnås en relativt god luftmengdefordeling for de fleste typer kombinasjoner av uttak som stenges og eventuell sensorplassering. Dette underbygger viktigheten av at kanalanlegget er innregulert på en god måte, men antyder også at det i mange tilfeller vil unødvendig med avanserte VAV-spjeld som justeres etter endrede trykkforhold for å opprettholde ønsket luftmengde. I slike tilfeller vil det være tilstrekkelig med typer VAV-spjeld som kun justeres etter signal fra romsensor for å endre nødvendig luftmengde. Dette er dog en påstand som kun vil gjelde for noen tilfeller, og medfører risiko for over- og underventilering i andre tilfeller.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

De målingene som resulterer i den dårligste luftmengdefordelingen (differanse på rundt 9-10 % mellom uttak med størst og minst luftmengdeavvik) gjelder for scenario 2, 13 og 21. Alle innebærer stenging av uttak 2. Hvis man også ser på de nest dårligste luftmengdefordelingene (differanse på rundt 7-8 % mellom uttak med størst og minst luftmengdeavvik) utgjør også scenarioer hvor uttak 2 stenges, en stor del av disse. Innenfor disse scenarioene igjen, er det sensorplassering før uttak 1 som fører til den mest skjevfordelte luften når uttak 2 stenges. Årsaken er trolig at når uttak 2 stenges økes motstanden utover i nettet og mer luft finner veien ut gjennom uttak 1. Resultatet er at uttak 1 får en del mer luft enn ønsket, samtidig som uttak 3 og 4 får en del mindre.

De beste luftmengdefordelingene (differanse på 0-2 % mellom uttak med størst og minst luftmengdeavvik) inntreffer for ulike kombinasjoner av stenging og sensorplassering. De fleste av scenarioene i dette tilfellet innebærer dog stenging av uttak 1. Så lenge resten av kanalnettet er godt innregulert, blir luftmengdefordelingen meget god. Disse resultatene kan overføres til at for eksempel rom med den hyppigste endringen i luftmengder sannsynligvis burde blitt plassert tidlig i et kanalstrekk med flere uttak. Samtidig viser de til at rom med konstante luftmengder og CAV-spjeld burde plasseres på slutten, og helst rett etter sensorplassering. Beregninger i Matlab viser det samme, og diskuteres senere.

Vedlegg 18 viser også at luftmengdefordelingen blir best når sensoren er plassert etter bend ved uttak 4, og dårligst når den er plassert før uttak 1. Både beregninger og målinger viser at det ofte blir lave luftmengder i uttakene når sensoren er plassert tidlig i kanalnettet. Det kan diskuteres om det er det faktum at sensoren før uttak 1 er mest ustabil som resulterer i for lave luftmengder for målingene, dette diskuteres under.

Med tanke på den relativt høye måleusikkerheten forbundet med luftmengdemålinger i uttak, som beskrevet i usikkerhetskapittelet, skal man være forsiktig med å trekke bastante slutninger. Nøye utførte målinger og klare sammenhenger i resultatene er på den andre siden et godt grunnlag for videre tolkning.

9.3 Logging av statisk trykk

Samtlige sensorer registrerte trykkendringene som oppsto på samme tid når ulike uttak ble stengt og redusert, men med ulike utslag. Samlet sett oppførte de ulike sensorene seg også likt i forhold til når svingninger oppsto, men også her med ulikt omfang. En parameter for valg av sensorplassering, er å se på svingninger. Store svingninger kan føre til at viften hele tiden justeres for å kompensere for avvik med ønsket og målt statisk trykk, med mindre kravet til dette avviket er stilt høyere enn det svingningene er. Det kan virke som at stabiliteten til sensoren reduseres jo større andel av totaltrykket som består av dynamiske trykk. Dette bygger i så fall også oppunder en anbefaling om å ha lave hastigheter i hovedkanalen og spesielt i det området sensoren er plassert.

Beregning av standardavvik på bakgrunn av trykksvingninger, viste at sensorene plassert tidlig i kanalnettet ga de mest ustabile verdien. Sensorene ved enden av kanalnettet var mest stabile. Bruken av standardavvik for å begrunne sensorstabilitet virker å være en fornuftig angrepsvinkel.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

En svakhet i målingene (grunnet begrenset antall trykktransducere) er at viften ikke ble styrt etter sensorer plassert etter spjeld i uttakene. I etterkant ser man at dette kunne vært interessant, for å simulere betydningen av å plassere trykksensor i grenuttak i stedet for i hovedkanal. Resultater fra disse målingene kunne blitt overført til å gjelde for situasjoner hvor hovedkanalen var plassert i sjakt, og hvor uttakene var grenkanaler som dekket større soner eller etasjer. Det ble gjort målinger av statisk trykk etter spjeld i uttak 3, og denne så ut til å registrere endringene på en god måte, i tillegg til å gi relativt stabile målinger. Det ble ikke plassert sensorer etter spjeld i de tre andre uttakene, så betydningen av en slik plassering kan ikke bekreftes eller avkreftes.

Avhengig av hva slags regulator og algoritme som blir benyttet for regulering av viftepådrag, kan valg av sensorplassering også ha betydning for vifteeffekt. Ved forskjellig plassering av trykksensor, kan registrering av endringer i statiske trykk variere i stor grad. I tilfeller hvor aktuell plassering gir en stor endring i forhold til ønsket verdi, og dermed et større avvik, vil dette kunne føre til at viften bruker lengre tid på å regulere luftmengden til korrekt verdi. Dette fører til høyere energibruk for viften. Det stilles spørsmålsteget til om valg av sensorplassering også bør velges ut i fra hvilke sensorer som fører til lavest avvik. Et lite avvik vil på den andre siden kunne medføre at viften ikke registrerer endringen, spesielt hvis sensornøyaktigheten er dårlig.

9.4 Beregninger av luftmengdefordeling med konstant statisk trykk

Som presentert i resultatene til beregningene, er det tydelige sammenhenger mellom beregningene i de forskjellige sammensetningene. Når det gjelder scenarioer hvor de første uttakene stenges (uttak 1-2 eller 1-4) blir luftmengdefordelingen i de resterende uttakene god, spesielt når det benyttes en mer nøyaktig stegvis regulering av hovedluftmengden. Grunnen til dette er trolig at spjeldene i de resterende uttakene er godt innregulert og ikke påvirkes i noen stor grad av endring tidlig i kanalnett.

I tilfeller hvor uttakene på midten av kanalnett stenges (uttak 5-6 eller 3-7), er den generelle trenden av luftmengdene i uttakene for den første delen av kanalnettet er lavere enn ønsket. For luftmengdene i uttakene etter de stengte uttakene, er trenden helt motsatt, altså høyere eller lik ønsket luftmengde. Disse resultatene er trolig på grunn av de låste spjeldtrykkfallene som er fastsatt på bakgrunn av innregulering ved maksimalbelastning. Luftmengdefordelingen vil bli skjevfordelt på grunn av at de låste trykkfallene er tilpasset og beregnet ut i fra normale driftsforhold.

I sammenstillingene hvor uttakene på slutten av kanalnett stenges (9-10 eller 7-10), er det forskjeller mellom de ulike kanalnettene (lik eller dimensjonert hovedkanal). I tilfeller hvor det er lik dimensjon på hovedkanal, er den generelle trenden at luftmengdene i de første uttakene er relativt høye og synker gradvis i uttakene utover i kanalnett. Trenden er motsatt i sammenstillinger hvor kanalnett er dimensjonert til å holde en viss hastighet (3-5 m/s) i kanalen. I de første uttakene er luftmengdene forholdsvis lave og stiger gradvis i uttakene utover i kanalnett.

I situasjoner hvor de siste uttakene stenges, viser resultatene en dårlig luftmengdefordeling i resten av kanalnett, uansett plassering av sensor. Dette kan bety

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

at det vil være ugunstig å plassere rom med lav tilstedeværelse på enden av kanalnettet. Dette kan også relateres til at det også vil være hensiktsmessig å plassere rom med konstant luftmengdebehov (CAV) på slutten av kanalnettet, hvis det er aktuelt med tilfeller hvor VAV og CAV kombineres i samme anlegg. Når det gjelder rom med stor variasjon i belastning vil dette sannsynligvis være best egnet på starten av kanalnettet, da dette ikke påvirker de resterende uttakene i stor grad. Disse antydningene stemmer godt overens med resultatene fra de målingene som er utført i oppgaven.

Når det gjelder plassering av trykksensor er dette et vanskelig tema, og det er komplisert å fastslå en generell konkret plassering. Beregningene som er utført antyder at trykksensoren bør plasseres mot slutten av kanalnettet. Det er ved slike plasseringer luftmengdefordelingen gir det beste resultatet, spesielt i tilfeller når det er lik dimensjon på hovedkanal.

Resultatene fra beregningene viste at det var mange av beregningene som hadde problemer med å gi en matematisk løsning ved dimensjonert hovedkanal. Dette kan antyde at det vil være mer hensiktsmessig å benytte en hovedkanal med lik dimensjon, da disse beregningene oftest konvergerer. Det er ikke tatt hensyn til økonomi her.

9.5 Beregninger av luftmengdefordeling og nødvendig trykkfall over VAV-spjeld - Spjeldautoritet

I følge beregninger for nødvendig trykkfall over spjeld, registreres det ingen åpenbare forskjeller mellom å benytte hovedkanaler med lik dimensjon hele veien, kontra dimensjonert hovedkanal på bakgrunn av krav til hastigheter (3-5 m/s). Resultatene viser allikevel noen forskjeller som kan være verdt å legge merke til.

Resultatene viser også at behovet for spjeldjustering er mindre i tilfeller med lik dimensjon på hovedkanal. Dette kan tyde på en mer stabil og robust regulering av anlegget, da store og hyppige svingninger unngås. Resultatene kan også med fordel overføres til at konsekvensene for luftmengdefordeling ikke blir like stor hvis man har tilfeller hvor VAV-spjeldene av en eller annen grunn ikke justerer spjeldposisjonen.

Det viser seg også at trykkfallet over spjeldet i de uttakene som ikke stenges eller strupes har en mye større relativ endring i kanalnettet med fire uttak. Ved valg av trykkfall over spjeld, er det dermed viktigere å ha kontroll på minimumstrykkfall i slike kanalnett, da endringer i luftmengder lettere kan føre til at noen spjeld opererer med for lave trykkfall i forhold til tilstrekkelig autoritet.

Lik kanaldimensjon på hovedkanal virker fornuftig både med tanke på lavere totaltrykk, og dermed lavere SFP-faktor, samt bedre spjeldautoritet. Hvilken av faktorene spjeldautoritet og SFP som bør veie tyngst kan diskuteres. Lav SFP må ikke gå utover spjeldautoritet og minimum trykkfall over spjeld, da det vil resultere i dårlig regulering. Dette kan igjen føre til over- og underventilering, og vil gi negative konsekvenser for energibehov og inneklima.

9.5.1 Utfordringer i beregningsverktøyet

Regneverktøyet som ble produsert i Matlab har fra et metodeperspektiv både styrker og svakheter. Regneverktøyet har mulighet til å simulere sensorplasseringer og regulere luftmengder for å opprettholde konstant statisk trykk på forskjellige steder i kanalnettet. Det er også mulig å beregne nødvendig trykkfall over spjeld for å oppnå optimal luftmengdefordeling mellom uttakene. Gruppen fant ingen kommersielle beregningsprogrammer som kunne utføre beregninger for justering av hovedluftmengde på bakgrunn av å opprettholde konstant statisk trykk i bestemte punkt i kanalnettet. Av den grunn ble det utarbeidet eget regneverktøy for dette formålet.

Beregningene som ble gjennomført er dynamiske og tar høyde for variasjoner i kanalnettet ved endringer av luftmengde. Når det gjelder enkeltmotstander og friksjon i kanaler blir det tatt høyde for at disse varierer direkte eller indirekte i forhold til ulike lufthastigheter.

Statiske trykkberegninger blir beregnet ved hjelp av anerkjente ligninger (Bernoulli og modifikasjoner av denne) som er godt utprøvd i forskjellige sammenhenger, blant annet i luftstrømningsberegninger. Av den grunn mener oppgavens forfattere at resultatene også her er solide og pålitelige.

Foruten manuelle beregninger og konvergeringstester har ikke regneverktøyet blitt validert i stor grad. Likevel har det blitt gjort omfattende vurderinger og tester av verktøyet, så gruppen mener resultatene fra beregningene som ble utført er troverdige og holdbare.

I beregningene hvor hovedluftmengden ble regulert etter å opprettholde konstant statisk trykk i valgte posisjoner, ble det benyttet faste verdier for spjeldtrykkfall. Dette er en faktor som påvirker luftmengdefordelingen i de forskjellige uttakene til en viss grad, avhengig av hvilke uttak som stenges. De faste spjeldtrykkfallene er beregnet på bakgrunn av maksimal belastning på samtlige uttak og vil dermed ikke være tilpasset situasjoner hvor enkelte uttak stenges. En bedre tilnærming i forhold til VAV-spjeld i praksis, ville vært å ha faste spjeldposisjoner i stedet for faste trykkfall. Dette er en forenkling som ble foretatt på bakgrunn av tidsmessige årsaker. Ønsket om å kunne sette spjeldposisjoner og ikke trykkfall over aktuelle spjeld, lot seg dessverre ikke oppfylle. Forenklingen vil likevel gi gode resultater for de problemstillingene som var ønsket å undersøke.

Når det gjelder tillatte differanser mellom beregnet statisk trykk og referansetrykk ved forskjellige sensorplasseringer, ble denne satt til 2,5 Pa. I utgangspunktet var det ønskelig å holde denne verdien så lav som mulig, for å oppnå mest mulig nøyaktige resultater for hovedluftmengde. Denne verdien ble valgt på bakgrunn av testing av ulike differanser, og var gjeldende for samtlige beregninger. Enkelte av resultatene avhenger i stor grad av denne fastsatte verdien.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

I noen tilfeller resulterte beregningene i luftmengder som var vanskelige å forklare, spesielt for uttakene i enden av kanalnettet. Dette kan skyldes måten kontinuitetsprinsippet er implementert i hovedalgoritme (Sørensen B. R.).

9.6 Kravspesifikasjon og beskrivelse

Arbeidet med kravspesifikasjon og beskrivelser har resultert i flere nye momenter og krav til hvordan behovstilpassede ventilasjonsanlegg kan fungere bedre i praksis. Dette er trolig momenter som vil komme ventilasjonsbransjen til gode og forhåpentligvis bidra til mer funksjonelle og robuste anlegg. Disse utarbeidet på grunnlag av generelle vurderinger av løsninger, og det er ikke gjennomført studier på eksisterende anlegg. Det er dermed uklart hvilken konsekvens disse momentene vil ha i praksis. Arbeidsgruppen er også mer eller mindre tilfeldig satt sammen, etter utsendelse av invitasjon til flere parter i ventilasjonsbransjen. Resultatene kunne dermed vært annerledes ved en annen sammensetning av arbeidsgruppen. Deltagerne består på den annen side av høyt kvalifiserte ressurser, og resultatene menes å ha høy troverdighet og kvalitet.

10 Konklusjon

På bakgrunn av de målinger og beregninger som er utført i forbindelse med oppgaven, samt litteraturstudier og en utførlig og omfattende diskusjonsdel, presenteres videre de slutninger som kan trekkes ut fra dette.

10.1 Plassering av trykksensor og kanaldesign

Det viser seg meget utfordrende å gi en konkret anbefaling om plassering av trykksensor, da resultatene varierer i forhold til kanalutforming og hvilke kombinasjoner av uttak som varierer i belastning. Både målinger og beregninger viser noen sammenhenger som underbygger videre slutninger.

Det dokumenteres i denne rapporten både gjennom målinger, litteraturstudie og beregninger, at det i de fleste tilfeller vil være mest fornuftig å plassere den statiske trykksensoren mot slutten av kanalnettet. Dette fører i de fleste tilfeller til den gunstigste luftmengdefordelingen. Resultater fra målinger av trykksvingninger for ulike sensorplasseringer bekrefter også at en plassering sent i kanalnettet vil gi de mest stabile statiske trykkmålingene. Stabile trykk er viktig for å unngå unødvendig justering av viftepådrag.

Når den siste delen av kanalnettet stenges eller reduseres derimot, viser både målinger og beregningsresultater at luftmengdefordelingen blir dårligere når også sensoren er plassert i dette området. I slike tilfeller er det bedre å plassere sensoren i starten av kanalnettet. Hvis man likevel velger en sensorplassering i enden av hovedkanalen, vil det være fornuftig å plassere eventuelle rom med stor variasjon i belastning i starten av kanalen. Dette kan også relateres til at det vil være hensiktsmessig å plassere rom med konstant luftmengdebehov (CAV) på slutten av kanalnettet, og helst rett ved sensorplassering, i tilfeller hvor VAV og CAV kombineres i samme kanalnett. Målinger og beregninger viser også at endring i starten av anlegget ikke påvirker de resterende uttakene i stor grad, så lenge disse er innregulert på en god måte.

En god innregulering av kanalnettet viser seg å være meget viktig, og spesielt i tilfeller hvor reguleringen av luftmengder ved hjelp av konstant statisk trykk ikke fungerer optimalt.

Når det gjelder kanalnettet og utformingen, viser målinger og beregninger at det vil være fordelaktig å konstruere hovedkanalen med lik dimensjon hele veien, kontra det å dimensjonere etter hastighetsmetoden. Lik dimensjon resulterer i lave hastigheter i hovedkanalen, og dermed mer stabile statiske trykkmålinger som følge av lavere dynamiske trykk. Lik dimensjon fører også til lavere trykkfall i kanalnettet, noe som gir positiv innvirkning på energieffektivitet og SFP-faktor. Det gir også en bedre spjeldautoritet, ved at hoveddelen av trykkfallet i kanalnettet legges over det regulerende VAV-spjeldet.

Tilstrekkelig autoritet over VAV-spjeld er viktig for stabil og nøyaktig regulering av luftmengder i et behovstilpasset ventilasjonsanlegg. Beregninger viser at ulike typer

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

kanalnett resulterer i ulike endringer i trykkfall over spjeld, men det ble funnet få tilfeller som resulterte i for dårlig spjeldautoritet. Gitt at spjeldautoriteten er god ved innregulert drift, vil den også i de fleste scenarioer være god selv om trykkforholdene i kanalnettet endres. Kanalnett med få uttak derimot, registrerer større endringer i trykkfall over spjeld. Dette må tas hensyn til ved innregulering for å opprettholde ønsket minimumstrykkfall over spjeld når ulike uttak varieres. Det vil si at det ikke vil være heldig å legge minimumstrykkfall over spjeld ved innregulert drift, da endringer i luftmengder kan føre til for lave trykkfall og dermed dårlig regulering. Beregninger viser også at kanalnett med lik dimensjon har de mest stabile endringene uttakene seg i mellom, noe som øker stabiliteten og robustheten i anlegget.

Samtidig som det ønskes relativ høy autoritet over spjeld, i form av trykkfall, er det også et ønske om å oppnå lav SFP-faktor. Da SFP-faktoren stiger med økt trykkfall i kanalnettet, er det viktig å finne et optimalt forhold mellom spjeldautoritet og minimum trykkfall.

10.2 Kravspesifikasjon og beskrivelser

For komplett oversikt over de momentene og kravene som ble resultatet av arbeidsgruppen, henvises det til resultatkapittelet 8.8. Videre presenteres hovedessensen av de viktigste momentene som fremgikk av arbeidsmøtene.

- **Krav til SFP-faktor ved to definerte driftsscenarioer**

Det anbefales å sette krav til SFP-faktor til hvert enkelt aggregat, ved to definerte driftsscenarioer innenfor den normale driftstiden. Det ene kravet skal gjelde for dimensjonerende forhold (og da gjenspeiler kravet i TEK10) og det andre for redusert drift. Ved å sette et slikt krav sørger man for å få kontroll på energieffektiviteten i anlegget ved flere driftsenarioer, ikke bare ved dimensjonerende forhold. Dette vil bidra til at anleggene må reguleres optimalt ved både høye og lave luftmengder.

- **Robuste anlegg**

I dette tilfellet er det snakk om ventilasjonsanlegg, som opprettholder stabil funksjon over tid i alle driftssituasjoner, utsatt for normale påkjenninger. Kravet kan etterprøves ved hjelp av en såkalt "stresstest". Det innebærer at anlegget blir tvunget til å utsettes for "worst-case"-lignende scenarioer, for så å registrere hvordan anlegget responderer på disse, samt analysere resultatene. Det bør utvikles en form for karakterskala med tanke på hvordan resultatene skal behandles og evalueres. Momenter i en slik "stresstest" kan for eksempel innebære:

- Tvangsstenging og åpning av ulike spjeld i anlegget, å undersøke luftmengdefordelingen til de aktuelle sonene/rommene som anlegget forsyner, før og etter endring.
- Kontroll om endringer i luftmengder på romnivå også gir tilsvarende endringer sentralt i anlegget.
- Kontrollere at SFP-faktoren reduseres ved redusert viftepådrag.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

- **Ansvarsplassering**

Tydeliggjøring av ansvarsplassering og eierskap. Det er viktig å plassere ansvaret på én aktør, slik at ikke alle skylder på alle og avvik og ugunstige forhold ikke blir utbedret. Den aktuelle aktøren må få kompensasjon, både økonomisk og tidsmessig, for å bli tiltransportert ansvarsoppgaven.

- **Strengere krav til komponenter**

For at ventilasjonsanlegget skal være funksjonelle og robuste i alle ledd, i tillegg til å være mest mulig energieffektivt, bør det rettes fokus mot de svakeste leddene, slik som trykk-, mengde- og inneklimasensorer, samt motorspjeld. Det må stilles strengere krav til disse, både i forhold til kalibrering, måleusikkerhet, autoritet og plassering.

10.3 Anbefalinger for videre arbeid

I forbindelse med denne rapporten er det lagt ned mye arbeid i å utvikle et beregningsverktøy og å utvikle kravspesifikasjoner. Begge vil bidra til videreutvikling og optimalisering av behovstilpassede ventilasjonsanlegg. Siste ord er ikke sagt og det er behov for mer forskning, men resultatene er et viktig grunnlag for videre arbeid. Det presenteres dermed noen tanker om hvordan innholdet i rapporten kan brukes videre i utviklingen av slike systemer.

10.3.1 Videreutvikling av beregningsverktøy

Beregningsverktøyet som ble utviklet i forbindelse med denne rapporten ga svar på flere spørsmål rundt sensorplassering og spjeldautoritet, og dets konsekvenser for luftmengdefordeling. Beregningene inneholder noen svakheter og begrensninger som bør utvikles videre slik at verktøyet kan forbedres og gi svar på ytterligere spørsmål. Beregningene er også kun foretatt for enkle kanalnett med 4,10 eller 20 uttak med like luftmengder, og bør utvikles videre med tanke på mer avanserte kanaldesign, samt med innhold av flere komponenter som lydfeller, ventiler, flere typer VAV-spjeld osv. Dette vil gi et mer nøyaktig resultat i forhold til de faktiske forhold. Selv om det kun er foretatt beregninger med like luftmengder per uttak, kan verktøyet slik det er utformet nå utføre beregninger for ulike luftmengder og ulike lengder mellom uttakene. Slike beregninger ble ikke utført grunnet begrenset tid, men vil være fullt mulig å arbeide videre med. Det er ikke foretatt beregninger for avtrekksventilasjon, noe som også er en viktig del av behovstilpassede ventilasjonsanlegg. Dette bør også være et tema for videre studier.

Det vil også være interessant å forbedre de algoritmene og konvergeringskriteriene som per dags dato ligger til grunn for beregningene, slik at man også finner gode løsninger på de scenarioene som ikke konvergente og ga noen matematiske løsninger i denne rapporten.

10.3.2 Kravspesifikasjoner i praksis

Når det gjelder de krav og momenter som er presentert over, er disse kun et resultat av samtaler mellom de involverte på bakgrunn av deres erfaringer. Det er ikke gjennomført studier på eksisterende anlegg, og kravene er ikke etterprøvd i praksis. Det er dermed uklart hvilke konsekvenser disse momentene vil gi. Gruppen mener momentene som kommer frem i denne rapporten er av stor interesse for bransjen, og vil bidra til mer robuste og funksjonelle ventilasjonsanlegg. Det anbefales at kravene innføres i fremtidige prosjekter, for å få tallfestet resultatet og etterprøvd disse, slik at de eventuelt kan videreutvikles.

11 Bibliografi

- U.S. environmental protection agency . (u.d.). Hentet fra Indoor Air Facts No. 4 (revised) Sick Building Syndrome: <http://www.epa.gov/iaq/pubs/sbs.html>
- Aizlewood, C.E. et al. (1996). Decipols: Should We Use Them? *Indoor and Built Environment*, 5 (5), 263-269.
- Andersson, K. (2008, 08 17-22). Indoor climate and health: What do we really know? *Indoor Air* .
- Arbeidstilsynet. (2006). *Veiledning om Klima- og luftkvalitet på arbeidsplassen*. Bestillingsnummer 444. Gyldendal Akademisk.
- ASHRAE. (u.d.). Energy Saving Project - Optimal Static Pressure Reset in Variable Air Volume Air Conditioning System.
- Benezeth, Y. et al. (2011). Towards a Sensor for Detecting Human Presence and Characterizing Activity. *Energy and Buildings*, 43, 305–314.
- Blomsterberg, A. (2000). Guidelines for performance based innovative mechanical ventilation systems. *Innovations in Ventilation Technology*. AIVC 21st Conference.
- Bornehag, CG. et al. (2001). Dampness in buildings and health. Nordic interdisciplinary review of the scientific evidence on associations between exposure to "dampness" in buildings and health effects (NORDDAMP). *Indoor Air*, 11, 72-86.
- Bornehag, CG. et al. (2004). Dampness in buildings as a risk factor for health effects, EUROEXPO: A multidisciplinary review of the literature (1998-2000) on dampness and mite exposure in buildings and health effects. *Indoor Air*, 14, 243-257.
- Chadwick, S. E. (1842). *Report on Sanitary Conditions*.
- Dansk Standard. (2003). *DS/EN ISO 5167-2: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 2: Orifice plates*. Denmark: Dansk Standard.
- Darby, S. et al. (2006). Residential radon and lung cancer--detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand J Work Environ Health*, 32, 1-83.
- Dougan, D. a. (2004, 10). CO₂-based Demand Control Ventilation. Do Risks Outweigh Potential Rewards. *ASHRAE Journal* .
- Ekberg, L. E. (1994). Volatile organic compounds in office buildings. *Atmospheric Environment*, 28 (22), 3571-3575.
- Enerdata. (2010). *Yearbook Statistical Energy Review 2010*. Retrieved 2011 йил 20-04 from Total energy consumption: <http://yearbook.enerdata.net>
- Engdahl, F. a. (2003). Pressure Controlled Variable Air Volume System. *Energy and Buildings*, 35, 1161–1172.
- EPA. (u.d.). *The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality*. Hentet 03 28, 2011 fra Publications and Resources: <http://www.epa.gov/iaq/pubs/insidestory.html>
- EU/Enerdata. (2006).
- Fahlén, P. (2008). *Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Systems Engineering. Addendum A*. Chalmers University of Technology.
- Fanger, P. (1988). Introduction to the Olf and Decipol Units to Quantify Air Pollution Percieved by Humans Indoors and Outdoors. *Energy and Buildings*, 12 (1), 1-6.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

- Fanger, P. (2000). Provide good air quality for people and improve their productivity. (H. Awbi, Ed.) *Air Distribution in Rooms (ROOMVENT 2000)* .
- Fisk, W. a. (1998). Sensor-based Demand-Controlled Ventilation: A Review. *Energy and Buildings* , 29 (1), 35-34.
- Fisk, W.J. et al. (2010). *CO2 Monitoring for Demand Controlled Ventilation in Commercial Buildings*. Report to the California Energy Commission.
- Fisk, WJ. et al. (2007). Meta-analyses of the association of respiratory health effects with dampness and mold in homes. *Indoor Air* , 17, 284-296.
- Fossen, T. (2008). *SFP - målinger og vurderinger for*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Grini, C. a. (2010). *LECO - Behovstilpasset ventilasjon. Hvordan får man alle brikkene på plass?* SINTEF Byggforsk. Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Halvarsson, J. et al. (2005). Measured Occupancy in an Office Building.
- Halvarsson, J. et al. (2007). Samtidighet som del av grunnlag for dimensjonering av ventilasjon (Ventilation system dimensioning based on building occupancy factor).
- Hansen, H.E. et al. (1997). *Danvak - Varme- og klimateknik. Grundbog* (Vol. 2). Denmark: Danvak ApS.
- IEA. (2008). *World Energy Outlook*. International Energy Agency.
- International Organization for Standardization. (1995). *ISO7730 - Moderate Thermal Environments- Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions For Thermal Comfort*. ISO (International Organization for Standardization).
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO (International Organization for Standardization). (1995). *ISO 7730 - Moderate Thermal Environments- Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*.
- Johansson, D. (2005). Occupancy Levels in Three Swedish Offices – PAPER IV: Influence on Energy Use. *Building and Environment* .
- Kercsmar, CM et al. (2006). Reduction in Asthma Morbidity in Children as a Result of Home Remediation Aimed at Moisture Sources. *Environ Health Perspect* , 114 (10), 1574–1580.
- Koch, P. (2006). The influence of Reynolds Number and size effects on pressure loss factors of ductwork components. *The Chartered Institution of Building Services Engineers* .
- Kommunal- og Regionaldepartementet. (2010). *Energieffektivisering av bygg. En ambisiøs og realistisk plan mot 2040*. Kommunal- og Regionaldepartementet.
- Krewski, D. et al. (2006). A Combined Analysis of North American Case-Control Studies of Residential Radon and Lung Cancer. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues* , 69 (7 & 8), 533 - 597.
- Lagoudi, A. et al. (1996). Volatile Organic Compounds in Office Buildings: 1. Presence of Volatile Organic Compounds in the Indoor Air. *Indoor and Built Environment* , 5, 348-354.
- Larsen, B. a. (2005). *Oppfølging av Digital Behovsstyrt Ventilasjon i Asker Kulturhus*. Enova SF.
- Lavenergiutvalget. (2009). Hentet 03 29, 2011 fra www.regjeringen.no/nb/dep/oed/dok/rapporter_planer/rapporter/2009/lavenergiutvalget---energieffektiviserin.html?id=570063

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

- Laverge J, et al. (2011). Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies. *Building and Environment*, 1, 1-7.
- Li et al. (2004). Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong. *Indoor Air*, 15, 83-95.
- Li et al. (2007). Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment – a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air*, 17 (1), 2-18.
- Lindab. (u.d.). Lindab. Hentet 06 02, 2011 fra http://itsolution.lindab.com/LindabWebProductsDoc/pdf/se/kanalsystem/tekn/03_bu90_se.pdf.
- Lindinvent A/B. (u.d.). Lindinvent A/B. Hentet 05 05, 2011 fra Products - TTD - Taktilluftsdon: <http://www.lindinvent.com/produkter/tilluftsdon/TTD/>
- Mäkinen, J. R. (2007). Specific fan power - a tool for better performance of air handling systems. *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors*.
- Maripuu, M.-L. (2009). *Demand Controlled Ventilation (DCV) Systems in Commercial Buildings*. Göteborg, Sverige: Chalmers University of Technology.
- Marmot, A. e. (2006). Building health: an epidemiological study of “sick building syndrome” in the Whitehall II study. *Occup Environ Med*, 63, 283-289.
- McKinsey & Company. (2007).
- Mingsheng Liu et al. (2007). Impact of Static Pressure Reset on VAV System Air Leakage, Fan Power and Thermal Energy - Part I: Theoretical Model and Simulation.
- Mingsheng Liu et al. (2007). Impact of Static Pressure Reset on VAV System Air Leakage, Fan Power and Thermal Energy - Part II: Case Demonstration for a Typical Climate System.
- Mysen, M. et al. (2011). Conversion From CAV to VAV - A Key to Upgrade Ventilation And Reach Energy Target in Existing Building Stock.
- Mysen, M. et al. (2003). Demand Controlled Ventilation for Office Cubicles- Can it Be Profitable? *Energy and Buildings*, 35 (7), 657-662.
- Mysen, M. et al. (2005). Occupancy Density and Benefits of Demand Controlled Ventilation in Norwegian Primary Schools. *Energy and Buildings*, 37 (12), 1234-1240.
- Mysen, Mads et al. (2000). *Energieffektiv viftedrift*. Statsbygg. Statsbygg.
- Nassif, N. et al. (2007). A new Operating Strategy for Economizer Dampers of VAV System. *Energy and Buildings*.
- Nielsen, P. V. (2006). Air Distribution in Aircraft Cabins Using Free Convection Personalized Ventilation. *DCE Technical Reports*, 3.
- Nielsen, P. V. (2009). Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces. *Journal of the Royal Society*.
- Norges vassdrag- og energidirektorat. (2009). Hentet 03 24, 2011 fra Varedeklarasjon 2009: <http://www.nve.no/no/kraftmarked/sluttbrukermarkedet/varedeklarasjon-2009>
- Norges vassdrag- og energidirektorat. (2008). *Varedeklarasjon 2008*. Hentet 03 24, 2011 fra <http://www.nve.no/no/Kraftmarked/Sluttbrukermarkedet/Varedeklarasjon-2008/>
- Park, JH. et al. (2006). Fungal and Endotoxin Measurements in Dust Associated With Respiratory Symptoms in a Water-damaged Office Building. *Indoor Air*, 16 (3), 192-203.
- Pekkanen, J. et al. (2007). Moisture damage and childhood asthma: a population-based incident case-control study. *European Respiratory Journal*, 29 (3), 509-515.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

- Persily, A. et al. (2003). *NISTIR 7042. Simulations of Indoor Air Quality and Ventilation Impacts of Demand Controlled Ventilation in Commercial and Institutional Buildings*. U.S. Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology (NIST).
- Persily, A. et al. (2004). Recommendations for Application of CO₂-based Controlled Demand Ventilation, Including Proposed Guidance for ASHRAE Standard 62 and California's Title 24. *Letter Report on Task 3.1.5a and 3.1.6a of CEC-EEB RMT Project*.
- Persily, A. et al. (2001). *State-of-the Art Review of CO₂ Demand Controlled Ventilation-Technology and Application*. NISTIR.
- Phillips, E. J. (2006). Designing and testing Demand Controlled Ventilation strategies. *National Conference on Building Commissioning*.
- Plan- og bygningsloven. (2010). *Recommendations for Application of CO₂-based Controlled Demand Ventilation, Including Proposed Guidance for ASHRAE Standard 62 and California's Title 24*.
- Röck, F. et al. (2008). Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chem. Rev.*, 108 (2), 705-725.
- Schell, M. a. (2001, 02). Demand Control Ventilation Using CO₂. *ASHRAE Journal*.
- Schild, P. &. (2009). Recommendations on Specific Fan Power and Fan System Efficiency. *Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)*.
- Seppänen, O. (1999). Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air*, 9, 226-252.
- Seppänen, O.A. et al. (2006). Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health. *ASHRAE Research Journal*.
- Shaobin Wang, H. A. (2007). Volatile Organic Compounds in Indoor Environment And Photocatalytic Oxidation: State of the Art. *Environment International*, 33, 694-705.
- SINTEF. (2007). From <http://www.sintef.no/uploadpages/31328/02-2011Energieffektive%20næringsbygg.pdf>
- SINTEF. (2007). *ENØK i bygninger. Energieffektiv energibruk* (Vol. 3). Trondheim, Norge: Gyldendal Norsk Forlag.
- SNL. (u.d.). *Store norske leksikon*. Hentet 03 28, 2011 fra <http://www.snl.no/>
- Statens energimyndighet. (2007). *Förbättrad energistatistik för lokaler - "Stegvis STIL" Rapport för år 1. Inventeringar av kontor och förvaltningsbyggnader*. Sweden.
- Statens Strålevern. (2011). *Statens Strålevern*. Hentet 03 31, 2011 fra Radon: www.nrpa.no/radon
- Statkraft. (u.d.). *Energikilder*. Hentet 03 29, 2011 fra Vannkraft: <http://www.statkraft.no/energikilder/vannkraft>
- Stein, J. et al. (2007). *The Advanced Variable Air Volume (VAV) System Design Guide*. California: California Energy Commission.
- Sun, Z. et al. (2010). In-situ Implementation and Validation of a CO₂-based Adaptive Demand Controlled Ventilation Strategy in a Multi Office Building. *Building and Environment*.
- Swegon AB. (u.d.). *Swegon AB*. Hentet 06 02, 2011 fra Behovstilpasset ventilasjon: <http://www.swegon.com/en/Products/Flow-Control/Demand-controlled-ventilation/System>, D. D. (u.d.). <http://www.dds.no/tutorial/vvs/pdf/plc.pdf>.
- Sørensen, B. (2002). *Application and Energy Consumption of Demand Controlled Ventilation Systems*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Trondheim: NTNU.
- Sørensen, B. R. (n.d.). Beregning av luftfordeling i kanalsystemer.

Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp

- T. Dokka et al. (2009). *Energieffektivisering i bygninger – mye miljø for pengene!* SINTEF Byggeforsk. Oslo: SINTEF Byggeforsk.
- Taylor, S. T. (2007). Increasing Efficiency With VAV System Static Pressure Setpoint Reset.
- Teknisk Forskrift*. (2010).
- Teknisk Ukeblad. (u.d.). *Teknisk Ukeblad*. Hentet 03 29, 2011 fra <http://www.tu.no/energi/article275278.ece>
- Teknisk Ukeblad. (u.d.). *Teknisk Ukeblad*. Hentet 03 29, 2011 fra <http://www.tu.no/energi/article264268.ece>
- Teknisk Ukeblad. (u.d.). *Teknisk Ukeblad*. Hentet 03 29, 2011 fra <http://www.tu.no/energi/article264268.ece>
- TROX Auranor. (u.d.). *TROX Auranor*. Hentet 06 2011 fra CO2- og temperatursensor: http://www.trox.no/xpool/download/no/auranor/technical_documents/dampers_flow_rate_contr/leaflets/Optosense_sensor.pdf
- Tuomainen, M. (2003). The 3-year follow-up study in a block of flats - Experiences in the use of the Finnish indoor climate classification. *Indoor Air*, 13 (2), 136-147.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (1991). *Indoor Air Facts No. 4 (revised) Sick Building Syndrome*.
- Wargocki P., et al. (1999). Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) "Symptoms and Productivity in an Office With Two Different Pollution Loads". *Indoor Air*, 9, 165-179.
- Wargocki P., et al. (2000). The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) - Symptoms and Productivity. *Indoor Air*, 10, 222-236.
- Wigenstad, C. G. (2011). LECO - Behovstilpasset ventilasjon - Hvordan får man alle brikkene på plass?
- Wyon, D. (2004). The effects of indoor air quality on performance and productivity. *Indoor Air*, 14, 92-101.
- Wyon, D. (1986). The effects of indoor climate on performance and productivity: a review. *WS and Energi*, 3, 59-65.
- Yang, Xue-Bin et al. (2010). Evaluation of four control strategies for building VAV air-conditioning systems. *Energy and Buildings*.

12 Vedleggsoversikt

- Vedlegg 1: Kildeoversikt med informasjon og nytteverdi
- Vedlegg 2: Uforming av regneverktøy i Matlab
- Vedlegg 3: Beregninger fra Matlab - Dimensjonert hovedkanal (20 uttak) steng 8 uttak [0,0001 justering av Q0]
- Vedlegg 4: Beregninger fra Matlab - Dimensjonert hovedkanal steng 1 uttak [sensor plassert likt i de forskjellige sammenstillinger]
- Vedlegg 5: Beregninger fra Matlab - Dimensjonert hovedkanal steng 2 eller 4 uttak [0,0001 justering av Q0]
- Vedlegg 6: Beregninger fra Matlab - Dimensjonert hovedkanal steng flere uttak [sensor plassert likt i de forskjellige sammenstillinger]
- Vedlegg 7: Beregninger fra Matlab - Dimensjonert hovedkanal(steng 2 eller 4 uttak) ulik sensor plassering
- Vedlegg 8: Beregninger fra Matlab - Lik dimensjon hovedkanal (20 uttak) steng 8 uttak [0,0001 justering av Q0]
- Vedlegg 9: Beregninger fra Matlab - Lik dimensjon hovedkanal steng 1 uttak [sensor plassert likt i de forskjellige sammenstillinger]
- Vedlegg 10: Beregninger fra Matlab - Lik dimensjon hovedkanal steng 2 eller 4 uttak
- Vedlegg 11: Beregninger fra Matlab - Lik dimensjon hovedkanal steng 2 eller 4 uttak [0,0001 justering av Q0]
- Vedlegg 12: Beregninger fra Matlab - Lik dimensjon hovedkanal steng flere uttak[sensor plassert likt i de forskjellige sammenstillinger]
- Vedlegg 13: Beregninger fra Matlab - Konvergeringstest dimensjonert hovedkanal steng 2 eller 4 uttak
- Vedlegg 14: Beregninger fra Matlab - Konvergeringstest lik dimensjon hovedkanal
- Vedlegg 15: Beregning av enkeltmotstand Lindab bend
- Vedlegg 16: Innregulering fysisk kanalnett i Aalborg
- Vedlegg 17: Oversikt Matlab - Beregning av trykk, trykkfall over spjeld, luftmengder og – hastighet for ulike kanalnett
- Vedlegg 18: Loggedata (trykk, frekvens, vifteeffekt, standardavvik, diagrammer for sensorplassering)
- Vedlegg 19: Statisk trykkkurvedigram fra målinger Aalborg
- Vedlegg 20: Rådata fra logging i laboratoriet i Aalborg
- Vedlegg 21: Kalibreringsdata for trykktransducere benyttet på laboratoriet
- Vedlegg 22: Møtereferater fra arbeidsgruppe – kravspesifikasjon og beskrivelser
- Vedlegg 23: Regneark fra Lindab med hastighets- og Reynoldsavhengige enkeltmotstander