

HØGSKOLEN I OSLO
OG AKERSHUS

GRUPPE

TILGJENGELIGHET

Åpen

Telefon: 22 45 20 00

Telefax: 22 45 32 05

Fakultet for Teknologi Kunst og design

Institutt for Bygg- og Energiteknikk

Studieprogram Energi og miljø i bygg

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 OSLO

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

KLASSE SRA	SKOLEÅR 2013	Emne: Masteroppgave	
OPPGAVERNS TITTEL Kartlegging av parametere til enkel beregningsmodell for valg av energioptimale, behovsstyrte ventilasjonsanlegg, og forslag til inndata for beregning av SFP i revisjon av NS 3031, Tillegg H basert på ytelser ved eksisterende bygg.		DATO 27.05.2013	
		ANTALL SIDER 75	
FORFATTER Thomas Moy		VEILEDER Peter Schild	
		BIVEILEDERE Mads Mysen Øystein Andersen	

Oppgavetekst:

Målet for masteroppgaven er som følger:

Hvilke parametere bør inngå i en enkel beregningsmodell for å velge et energioptimalt, behovsstyrt ventilasjonsanlegg? Parametere for enkel beregningsmodell kartlegges. Videre fremlegges det forslag til verdier som kan benyttes i beregning av SFP ved behovsstyring for revisjon av NS 3031, Tillegg H. Forslagene til verdier til SFP-beregning baseres på dokumentasjon av virkelige ytelser av behovsstyrte ventilasjonsanlegg ved eksisterende bygg.

Følgende punkter dokumenteres, basert på ulike driftsstillinger ved fire bygg:

- Ventilasjonsanleggets reguleringstrykk.
- Ventilasjonsanleggets eksterne trykkfall.
- Strømningsforhold i ventilasjonsaggregatet.
- Fordeling av trykkfall i ventilasjonssystemet.
- Forhold mellom luftmengder og viftens trykkoppbygning.
- Forhold mellom luftmengder og viftenes systemvirkningsgrad.
- Forhold mellom luftmengder og SFP.

På grunnlag av dokumentasjonen gis det forslag til følgende inndata til beregning av SFP til revisjon av NS 3031, Tillegg H:

- Reguleringstrykk
- Dimensjonerende eksternt trykkfall
- Ventilasjonsaggregatets strømningssekspont

Krav:

Masteroppgaven skal være basert på forskningsmessige prinsipper.

Masteroppgaven skal utgjøre en individuell, selvstendig fordypning innenfor et sentralt fagområde i masterstudiet. Masteroppgaven skal inneholde en vesentlig lengre redegjørelse for masteroppgavens tema og diskusjonen en vesentlig mer omfattende diskusjon. Kvalitetssikre kildehenvisninger og tilhørende kildeliste
Masteroppgaven vil kunne være knyttet opp til oppdragsgivers problemstilling selv om denne ikke er av direkte vitenskapelig natur. De faglige ansvarlige vil se til at det blir et rimelig innslag av vitenskapelige problemstillinger, løsningsmetoder og kritisk refleksjon.

- Inntil 20 timers veiledning med 2 stk obligatoriske milepælmøter
- Oppgaveteksten skal ligge bak forsiden til rapporten
4 innbundne eksemplarer samt elektronisk versjon
- Muntlig presentasjon av rapporten
- Utarbeidelse av 1 poster
- Hver student blir eksaminert om prosjektrapporten
- Masterprosjektoppgave innleveres i wordformat (.doc, docx) uten passordbeskyttelse
- Alle regneark innleveres i .xls eller .xlsx format uten passordbeskyttelse
- Alle tegninger leveres i originalformat (dwg, ...)
- Alle Powerpoint-presentasjoner leveres i .ppt format uten passordbeskyttelse
- Relevante håndskrevne notater skannes og leveres i .jpg eller .pdf format

Oppdragsgiver får en papirversjon og en elektronisk versjon av prosjektrapporten

Referanser til masterprosjektet :

Peter Schild, Høgskolen i Oslo og Akershus, Pilestredet 35, Oslo, tlf.:22 45 33 17, e-mail: peter.schild@hioa.no

Nr	Milepæl/Delmål	FRIST for godkjenning etter utlevering	Dato for godkjenning	Godkjent og signert av faglærer/veileder
1	Prosjektstruktur og løsning av oppgaven 1)	Uke 7 eller 8		
2	Design og beregninger, resultater og diskusjon 2)	Uke 16-18		
4	Innlevering av rapport og målerutstyr	28.mai.13 kl 12		
5	Innlevering av 1 stk poster 4)	28. mai 2013 Kl 12		
6	Presentasjon av prosjektet og poster samt eksaminering 3)	18.6 og 19.6 2013		

1) Presenteres på møte med nødvendig dokumentasjon

2) Beregninger og forutsetninger presenteres i møtet

3) Etter presentasjonen blir hver enkelt eksaminert om prosjektet

4) Utarbeidelse av 1 poster som gir uttrykk for resultatene i prosjektet

Det er obligatorisk oppmøte ved milepælpresentasjonene og ved presentasjon av ferdig prosjekt.

FORORD

Med bachelorgrad i konstruksjonsteknikk ønsket jeg i masteren å bli kjent med de tekniske systemene som inngår i et bygg, for å få en mer helhetlig forståelse for hvordan et bygg er sammensatt. Ved masterlinjen Energi og miljø i bygg ved Høgskolen i Oslo og Akershus fattet jeg raskt interesse for behovsstyrt ventilasjon og mulighetene det gav rom for. Jeg ble også gjennom undervisning gjort oppmerksom på at det er flere feil man lett kan begå under prosjektering av et ventilasjonsanlegg, og i en god del tilfeller gjøres akkurat det. Min motivasjon under dette prosjektet har vært å være med på å belyse de viktigste punktene som en bør vektlegge for å ta riktige valg under prosjekteringsfasen, som vil redusere energibehovet i ventilasjonsanlegg. Gjennom masterprosjektet har jeg fått anledning til å bli kjent med flere former for behovsstyring, og sett hvordan dette fungerer i praksis ved de utvalgte byggene.

Målinger ved de ulike byggene er utført i samarbeid med medstudent Leif Arne Stadheim, samt forberedelser til målingene. Vi har videre utarbeidet kapittelet for målemetode, korrigering av måleresultat og behandling av rådata som har dannet grunnlaget for videre beregninger. Beskrivelse av de ulike byggene og erfaringer fra måling er skrevet i fellesskap. Jeg takker for et godt samarbeid.

Jeg ønsker å rekke en stor takk til hovedveileder Peter Schild (SINTEF Byggforsk/HiOA), for god veiledning og oppfølging gjennom dette semesteret. Takk til biveiledere Mads Mysen (SINTEF Byggforsk) og Øystein Andersen (HiOA) for gode råd og innspill.

I gjennomføring av målinger ved de utvalgte byggene har vi hatt hjelp av dyktige og tålmodige personer. Jeg ønsker å takke Bjørn S. Johansen (GK), Rolf Sørli (Swegon), Pål Hansen (Saas Prosjekt AS) og Geir Vaagan (Avantor), for å ha vist stor interesse til prosjektet, gitt gode forslag til bygg som hadde de ønskede forutsetningene og stilt med dokumentasjon. Jeg ønsker også å takke Jan Erik Nilsen (GK), Lars Jørgen Stenvaag (Saas Prosjekt AS), Gunnar Aslesen (Forskningsparken) og Mathias Ødegård (AF Gruppen) for god hjelp med drift av ventilasjonsanleggene. Takk til SINTEF Byggforsk for utlån av måleinstrumenter, ekstraputstyr, og for å ha stilt med kontorplass og et flott arbeidsmiljø. Dette masterprosjektet inngår i FoU-prosjektet reDuCeVentilation, og jeg ønsker i den anledning å takke for støtte i gjennomføring av prosjektet.

27.05.13

Thomas Moy

INNHALDSFORTEGNELSE

Forord	V
Tabelliste.....	X
Figurliste.....	XI
Vedleggsliste.....	XIII
Sammendrag	XIV
1 - Innledning.....	1
1.1 - Hensikt	3
2 - Utvalg.....	4
2.1 - Utvalgte bygg.....	4
2.1.1 - Miljøhuset GK	4
2.1.2 - Aibel-bygget	5
2.1.3 - Nydalen Videregående skole.....	7
2.1.4 - Forskningsparken	8
3 - Metode.....	9
3.1 - Trykkmåling.....	9
3.1.1 – Benyttet måleinstrument	9
3.1.2 – Bestemmelse av målepunkt for reguleringstrykk	10
3.1.3 - Bestemmelse av eksternt trykkfall.....	10
3.1.4 - Statisk trykkmåling i kanal.....	11
3.1.5 - Dynamisk trykkmåling i kanal.....	11
3.1.6 - Krav til måleavstander og utførelse.....	12
3.1.7 - Statisk trykkmåling over komponenter i aggregat	12
3.1.8 - Trykkmåling for beregning av luftmengde	13
3.1.9 - Metodefeil	14
3.2 - Hastighetsmåling.....	15
3.2.1 - Benyttet måleinstrument	15
3.2.2 – Måling av lufthastighet.....	15
3.3 - Temperaturmåling	16

3.3.1 – Benyttet måleinstrument	16
3.3.2 – Måling av temperatur og barometertrykk	17
3.4 - Feilkorreksjon	17
3.4.1 - Feilkilder og korreksjoner ved måling av lufthastighet og trykk.....	17
3.4.2 – Beregning av målefeil	18
3.5 - Effektmåling.....	19
3.5.1 – Benyttet måleinstrument	19
3.5.2 – Trewattmetermetoden, effektmåling i TN-nett	20
3.5.3 - Wattmetermetoden	21
3.5.4 - Måleavvik	21
3.6 - Analyse.....	22
3.6.1 – Beregning av strømningssekspont	22
3.6.2 – Beregning av luftmengder.....	23
3.6.3 - Luftmengdelekkasje i renblåsningssektor	25
3.6.4 – Beregning av SFP, basert på målte verdier.....	26
3.6.5 – Beregning av reguleringstrykk	27
3.6.6 – Beregning av eksternt trykkfall og viftenes trykkoppbygning	27
3.6.7 – Beregning av målt total systemvirkningsgrad	28
3.6.8 – Beregning av dimensjonerende eksternttrykk og reguleringstrykk i henhold til NS3031, Tillegg H ...	28
3.6.9 – Beregning av teoretisk trykkoppbygning, systemvirkningsgrad og SFP	28
4 - Resultater	29
4.1 – Kartlegging av aktuelle parametere for enkel beregningsmodell.....	29
4.1.1 - Livssyklus kostnadsanalyse	29
4.1.2 – Hvor ligger energibehovet i et ventilasjonsanlegg?	29
4.1.3 - Samtidighet og tilstedeværelse	31
4.1.4 - Valg av sensorer	31
4.1.5 – Klimatisering og varmegjenvinning.....	32
4.1.6 – Valg av vifte	33
4.1.7 – Systemeffekt	34

4.1.8 – Beregning av SFP og eksternt trykk for ulike driftspunkt.....	35
4.1.9 – Beregning av tidsmidlet SFP	36
4.2 – Ytelser ved eksisterende anlegg og aktuelle inndataverdier	37
4.2.1 – Driftsstillinger	37
4.2.2 – Beregnede SFP-verdier basert på måledata	38
4.2.3 - SFP	42
4.2.4 - Beregnede inndataverdier for revisjon av NS 3031, Tillegg H.....	43
4.2.5 - Strømningseksponent for komponentene	49
4.2.6 - Strømningseksponenter i ventilasjonsaggregat	50
4.2.7 - Målt trykkoppbygning og andel eksternt og internt trykkfall.....	52
4.2.8 – Beregnet dimensjonerende eksternt- og reguleringstrykk.....	53
4.2.9 - Beregnet SFP i henhold til revisjon av NS 3031, Tillegg H.....	55
4.2.10 - Total systemvirkningsgrad (Statisk).....	57
4.2.11 - Sammenligning av SFP fra måling og beregningsmodell	58
5 - Diskusjon.....	59
5.1 - Parametere som bør inngå i enkel beregningsmodell.....	59
5.2 – Forslag til inndata i SFP-beregning i revisjon av NS 3031, Tillegg H.....	65
5.2.1 - Målte og registrerte luftmengder.....	65
5.2.2 - Renblåsningssektor	66
5.2.3 - Effektmåling	67
5.2.4 - SFP	67
5.2.5 - Reguleringstrykk	68
5.2.6 - Eksterne trykkfall.....	70
5.2.7 – Strømningseksponent.....	70
5.2.8 - reguleringstrykk og dimensjonerende eksternt trykkfall.....	72
5.2.9 - Total systemvirkningsgrad basert på målte verdier.....	73
5.2.10 – Sammenligning mellom målt og beregnet SFP.....	74
5.3 - Konklusjon	75
5.4 - Anbefaling til videre arbeid	75

6 – Referanser	76
----------------------	----

TABELLISTE

Tabell 1 Samtidigheter for de ulike driftsstillingene	37
Tabell 2 Luftmengder og måleusikkerhet	38
Tabell 3 Luftlekkasje i renblåsningssektor.....	41
Tabell 4 Målte effekter.....	42
Tabell 5 Beregnet SFP fra målte verdier.....	43
Tabell 6 Målt statisk og dynamisk trykkfall reguleringstrykk	43
Tabell 7 Målt og registrert reguleringstrykk	46
Tabell 8 Målt eksternt trykkfall og trykkoppbygning på tillufts- og avtrekkssiden.	48
Tabell 9 Beregnede strømningseksponenter for ulike aggregatkomponenter ved Aibel-bygget.	49
Tabell 10 Beregnede strømningseksponenter for ulike aggregatkomponenter ved Miljøhuset GK.....	49
Tabell 11 Beregnede strømningseksponenter for aggregatet ved Miljøhuset GK.	50
Tabell 12 Beregnede strømningseksponenter for aggregatet ved Aibel-bygget	50
Tabell 13 Beregnede strømningseksponenter for aggregatkomponenter fra simulering for Aibel-bygget i ProUnit.	51
Tabell 14 Beregnede strømningseksponenter for aggregatkomponenter fra simulering for Miljøhuset GK i SystemairCAD.....	51
Tabell 15 Beregnede strømningseksponenter for aggregat, basert på simulering.	52
Tabell 16 Målt trykkoppbygning over vifter.....	52
Tabell 17 Målt fordeling mellom trykkfall internt i aggregat og eksternt i kanalnettet.....	53
Tabell 18 Tilpasset dimensjonerende eksterntrykk og reguleringstrykk for beregning av SFP ved strømningseksponent lik 1,4.	54
Tabell 19 Beregning av hva eksterntrykk og trykkoppbygning over vifte bør være for at reguleringstrykket skal utgjøre 25 % av dimensjonerende eksterntrykk.	54
Tabell 20 Beregnede SFP-verdier for Miljøhuset GK.....	55
Tabell 21 Beregnede SFP-verdier for Aibel-bygget.	56
Tabell 22 Beregnet SFP-verdi for Forskningsparken.	56
Tabell 23 Beregnet SFP-verdi for Nydalen Videregående skole.....	57

FIGURLISTE

Figur 1 DPM TT570SV	9
Figur 2 Målepunkt for måling av reguleringstrykk for aktiv tilluftsventil og VAV-spjeld.....	10
Figur 3 Målepunkter for eksternt trykkfall på tillufts- og avtrekkssiden.....	10
Figur 4 Måling av statisk trykk i kanal.....	11
Figur 5 Kobling - Statisk trykkmåling.....	11
Figur 6 Kobling - Dynamisk trykkmåling.	11
Figur 7 Målepunkt for trykkfall. Grønt viser trykkfallsmåling for strømningssekspont i aggregatet. Rødt viser trykkfallsmåling for hver enkelt komponent.	12
Figur 8 Parallellkobling med T-stykke.....	13
Figur 9 Prinsipp, trykkmåling ved venturi [3].....	13
Figur 10 Swema 3000 MD.....	15
Figur 11 Måling av temperatur før vifteinnløp.	17
Figur 12 CA8334 nettanalysator [1]	19
Figur 13 Fluke 43 effektanalysator [2].....	19
Figur 14 Figuren viser tilkobling av en analysator til et tre-fase-nett. N-lederen blir tilkoblet som illustrert (den stiplede linja).....	20
Figur 15 Effektmåling i TN-nett. De tre wattmeterne illustrerer hver av målingene CA 8334 utfører.	20
Figur 16 Wattmetermetoden tilknyttet en en-fase last.....	21
Figur 17 Prinsippskisse av roterande varmeveksler i ventilasjonsaggregat. Modifisert skjermdump fra [47].....	25
Figur 18 Komponenter i et ventilasjonsanlegg med energibehov [9].....	30
Figur 19 Viser sammenheng mellom luftmengder per dag og ulike lengder for driftstid i timer [4]	31
Figur 20 Fordeling av årlig energibudsjett, SIMIEN-simulering skolebygg med temperaturvirkningsgrad lik 85 %.....	32
Figur 21 Fordeling av årlig energibudsjett, SIMIEN-simulering kontorbygg med temperaturvirkningsgrad lik 85 %.....	32
Figur 22 [Fig. © ACME Engineering & Manufacturing Corp]	33
Figur 23 Loggede luftmengder fra Lindinspect ved måledag [63].....	39
Figur 24 Målte og registrerte luftmengder – Miljøhuset GK.....	39
Figur 25 Målte og registrerte luftmengder - Aibel-bygget	40

Figur 26 Målte og registrerte luftmengder - Nydalen Videregående skole	40
Figur 27 Målt og registrert luftmengde - Forskningsparken.....	41
Figur 28 Målt reguleringsstrykk på tilluftssiden.....	44
Figur 29 Målt reguleringsstrykk på avtrekkssiden	44
Figur 30 Logget reguleringsstrykk fra måledagen. Skjermdump fra Lindinspect [63].....	45
Figur 31 Logget reguleringsstrykk fra Lindinspect ved tilfeldig ukedag. Skjermdump fra Lindinspect [63].	46
Figur 32 Målte eksterstrykk fra tillufts- og avtrekkssiden ved Miljøhuset GK.....	47
Figur 33 Målte eksterstrykk fra tillufts- og avtrekkssiden ved Aibel-bygget.....	47
Figur 34 Målt eksterstrykk fra tillufts- og avtrekkssiden ved Nydalen VGS.....	48
Figur 35 Målt eksterstrykk fra tillufts- og avtrekkssiden ved Forskningsparken	48
Figur 36 Fordeling av trykkfall fra beregning.	55
Figur 37 Beregnet total systemvirkningsgrad for tilluftsvifte, basert på målte verdier.	57
Figur 38 Beregnet total systemvirkningsgrad for avtrekksvifte, basert på målte verdier.	58
Figur 39 Beregnede SFP-verdier basert på målinger.....	58
Figur 40 Beregnede SFP-verdier fra utkast til revisjon av NS 3031, Tillegg H.	59
Figur 41 Kurver for total systemvirkningsgrad hvor konstanten k endres, beregnet etter formel i utkast til revisjon av NS 3031 Tillegg H.....	63
Figur 42 Forslag til prinsipiell oppbygning av beregningsmodell [Modell laget på www.glify.com].....	65

VEDLEGGSLISTE

Vedlegg A	Beregninger
Vedlegg B	SIMIEN-simuleringer
Vedlegg C	Aggregatsimulering – Aibel-bygget (ProUnit)
Vedlegg D	Aggregatsimulering – Miljøhuset GK (Driftst. 1)
Vedlegg E	Aggregatsimulering – Miljøhuset GK (Driftst. 2)
Vedlegg F	Aggregatsimulering – Miljøhuset GK (Driftst. 3)
Vedlegg G	Byggbeskrivelser
Vedlegg H	Referat fra milepælsmøter
Vedlegg I	Kilder
Vedlegg J	Måleprotokoll (mal)
Vedlegg K	Poster

SAMMENDRAG

Med det nye ambisjonsnivået regjeringen har satt i Stortingsmelding 21 om passivhusnivå i 2015 og nesten nullenerginivå i 2020, er bransjen nå nødt til å se nærmere på tiltak for å redusere energibehovet i bygg. Det er et stort energisparepotensiale for ventilasjonsanlegg, og dette kan oppnås blant annet ved å benytte behovsstyrt ventilasjon og gjøre riktige valg under prosjektering. Av økonomiske hensyn skal planlegging og prosjektering av ventilasjonsanlegg helst skje raskt, og dette kan gå ut over viktige detaljer som er med på å optimalisere et ventilasjonsanlegg. Det er dermed avgjørende at det rettes fokus mot avgjørende parametere, for å oppnå et ventilasjonsanlegg med energioptimal drift. For å gjøre at de kritiske valgene ikke blir for tidkrevende å ta, bør det utarbeides en enkel beregningsmodell. Denne modellen bør kreve få inndataparametere, som gir de beste løsningene basert på realistiske verdier. Før en slik beregningsmodell kan utvikles, er det behov for å finne fram til hvilke parametere som er viktige å implementere, samt innhente dokumentasjon av virkelige ytelser fra behovsstyrte ventilasjonsanlegg. Dette prosjektet har dermed gått ut på å kartlegge disse parameterne og gi forslag til verdier som kan benyttes i SFP-beregning i ny revisjon av NS 3031, Tillegg H [5].

Det er utført målinger ved tre kontorbygg og ett skolebygg, hvor alle byggene har ulike former for behovsstyring. Vanskeligheter med å tvangsstyre ventilasjonsanlegg i ulike driftsstillinger førte til at det ved ett bygg ble målt ved tre driftsstillinger, ett ved to driftsstillinger og to bygg ved én driftsstilling. Systemene som benyttes i disse byggene er fra Lindinvent, Swegons WISE-system, Digitalt Behovstilpasset Ventilasjon (DBV) og trykløs styring fra SIEMENS/Johnson Control.

Det er målt eksterne trykkfall, trykkoppbygning og reguleringstrykk ved bruk av mikromanometer. I behovsstyrte anlegg endrer kritisk vei seg, i motsetning til anlegg med konstante luftmengder hvor plasseringen forholder seg konstant. For å forsøke å finne reguleringstrykket i anleggene, er det målt trykk ved ulike ventiler. For å bestemme det eksterne trykkfallet, er det målt på hver side av aggregatet på tillufts- og avtrekkssiden. For å kunne bestemme strømningsforholdene i aggregatene, er det målt trykkfall over hver av komponentene ved ulike luftmengder. Luftmengdene ble beregnet fra trykkfalls- og temperaturmåling ved viftenes innløp (venturi), og ved samtlige grenspjeld der det ikke var montert trykkuttak ved venturi. Ved enkelte ventiler ble luftmengden målt ved bruk av termisk anemometer for hastighetsmåling. Effekten ble målt med en tre-fase-nettanalysator (trewattmetermetoden), samt en effektanalysator (med wattmetermetoden) for måling ved aggregatets styrestrøm. Alle målte verdier er korrigert for avvik spesifisert i instrumentenes kalibreringsbevis, samt kanalenes dimensjon og form. Det er også beregnet måleusikkerhet med hensyn til instrumentenes og metodenes usikkerhet.

StrømningsekspONENTER er beregnet som stigningstallet for forholdet mellom trykkfall over komponenter og luftmengden som passerer. Luftmengdemålingene over viftene er beregnet etter produsentenes angitte formler og konstanter, og luftlekkasje i renblåsningssektor er beregnet etter metode gitt av Eurovent [6]. SFP-verdiene er beregnet som forholdet mellom målt effekt ved tillufts- og avtrekksvifte og største luftmengde av tilluft og avtrekk. Teoretisk beregning av SFP er gjort i henhold til utkast til revisjon av NS 3031, Tillegg H.

I kartlegging av parametere til enkel beregningsmodell er det belyst at LCC-analyse kan være et nyttig verktøy for å sammenligne alternative løsninger. Det er presentert litteratur for forskjellige parametere for å komme fram til hvilken innvirkning de har på energibehovet, og hvordan de vil passe inn i den aktuelle beregningsmodellen. Videre er det bestemt hvilke parametere som vil kunne utgjør variasjoner i energibehovet og hvilke som vil holde seg konstante for ulike styresystem. I målingene ved de ulike byggene er det sett nærmere på forskjeller mellom målte og registrerte luftmengder for å underbygge de målte verdiene, og det er presentert størrelsesorden av hvor mye luftlekkasjene gjennom renblåsningssektoren kan utgjøre. Beregnede SFP-verdier basert på målte verdier er presentert for å kunne sammenligne med beregninger utført i henhold til formler presentert i utkastet av Tillegg H. Målte reguleringstrykk sees i sammenheng med samtidigheten, og blir for ett av byggene også sammenlignet med hva som er registrert gjennom anleggets oversiktsprogram. Videre er resultater fra målte eksterne trykkfall og trykkoppbygning over viftene presentert, som har dannet grunnlaget for å beregne dimensjonerende eksterne trykkfall og reguleringstrykk for beregningsmodellen. For å finne fram til en anbefalt strømningsekspONENT for ventilasjonsaggregatene er det studert strømningsforhold over hver av komponentene, samt strømningsforhold for henholdsvis tillufts- og avtrekksiden. Som en del av argumentasjonen for beregningsmodellen er det presentert resultater for trykkoppbygning for hver av viftene og fordeling av trykkfall i aggregat og kanalsystem, samt grafisk framstilling av målte og beregnede SFP-verdier.

Parameterne som foreslås for en enkel beregningsmodell for valg som resulterer i lavere energibehov for ventilasjonsanlegg er: LCC-analyse for oversiktlig sammenligning av løsninger hvor parameterne som vil variere er samtidighet og tilstedeværelse for bestemmelse av luftmengder, oppvarming og kjøling av tilluft og varmegjenvinning fra avtrekksluft for å kunne se reduksjon i energi til klimatisering av tilluft. Systemeffekten bør medregnes for å ta hensyn til økt energibehov når det ikke sikres fullt utviklet strømningsforhold i kanal før og etter aggregat. Årsgjennomsnittlig SFP bør også inngå, hvor viftens virkningsgrad påvirkes av blant annet viftenes størrelse i forhold til mest opptredende driftspunkt, og hvor beregning av trykkoppbygningen vil avhenge av blant annet valgt styresystem. Behovsstyringssystemene vil kunne gi forskjellig energibehov, ved at enkelte systemer vil kunne tilpasse luftmengdene bedre i forhold til behovet enn andre. Her bør det utføres forsøk

som kan gi svar på hva forskjellene i luftmengdene er for ulike systemer. Dette forskningsprosjektet har ikke hatt som mål å gi svar på dette spørsmålet.

For revisjon av NS 3031, Tillegg H, foreslås følgende inndata basert på utførte målinger ved fire bygg:

- Reguleringstrykk ved behovsstyring av luftmengdetilførsel: 100 Pa.
- Dimensjonerende eksternt trykkfall på enten tilluft- eller avtrekksside:
 - o Kanalsystem med utforming som er med på å gi lavt trykkfall: 250 Pa
 - o Kanalsystem hvor det av praktiske hensyn ikke kan garanteres slik utforming: 350 Pa.
- StrømningsekspONENT i ventilasjonsaggregat: 1,4

Det oppfordres til slutt å innhente ytterligere dokumentasjon fra andre behovsstyrte ventilasjonsanlegg, for å finne ut om verdiene som her er foreslått vil passe for andre bygg. Det anbefales også å se på alternative måter å lokalisere reguleringstrykket i behovsstyrte ventilasjonsanlegg, og andre løsninger for tvangsstyring av anlegget i ulike driftsstillinger.

1 - INNLEDNING

Det har de siste årene blitt rettet større fokus på å redusere energibehovet for å begrense CO₂-utslippene. FNs klimakonvensjon har satt som mål å redusere klimagassutslippene til et nivå som forhindrer farlig, menneskeskapt påvirkning av klimaet på jorden [7]. I 2010 utgjorde oppvarming, fjernvarmeproduksjon og annet energiforbruk i byggsektoren 5 % av det totale klimagassutslippet i Norge [7]. Sett fra byggsektorens perspektiv, merkes denne utviklingen i form av at både myndighetene og kundene stadig stiller strengere krav til bygningskonstruksjonen og de tekniske systemene. I Stortingsmelding 21, som omhandler norsk klimapolitikk, har regjeringen satt som mål å «skjerpe energikravene i byggeteknisk forskrift til passivhusnivå i 2015 og nesten nullenerginivå i 2020» [7]. Dette gjør at bransjen nå er nødt til å se nærmere på tiltak for å redusere energibehovet i bygg.

For å oppnå et reelt lavt energibehov i yrkesbygg, er det nødvendig å ha behovsstyring av teknisk utstyr. Det er et stort potensiale for å redusere energibehov for ventilasjonsanlegg. Denne besparelsen kan oppnås blant annet ved å erstatte ventilasjonsanlegg som benytter konstante luftmengder (CAV) med behovsstyrt ventilasjon, der lufttilførselen styres optimalt etter behovet i hvert rom. Et forsøk ved flere skoler i Oslo viser at energibehovet kan reduseres betydelig ved å erstatte CAV-løsning med Demand Controlled Ventilation (DCV, behovsstyrt ventilasjon) med CO₂-sensor og IR-sensor (registrerer tilstedeværelse). Utskriftningen førte til en reduksjon i energiforbruket til ventilasjonsanlegget på 38 % og 51 % for behovsstyring med henholdsvis CO₂-sensor og IR-sensor [4].

Selv om det nå er vanlig å installere ventilasjonsanlegg med behovsstyring framfor ventilasjonsanlegg som leverer konstante luftmengder (CAV), er behovsstyring på ingen måte en ny idé. Et litteratursøk utført av The International Energy Agency (IEA) i 1990 [8] viste at det ble gjort mye forskning på behovsstyrt ventilasjon allerede tidlig på 80-tallet. Fram til 1983 lå det største fokuset på energibesparelse og tilbakebetalingstid. Senere på 80-tallet ble fokuset stadig mer rettet mot hvordan dette også kunne være med på å sikre bedre inn klima. Det ble utført en rekke forsøk med ulike typer sensorer for å finne ut hvilke parametere som førte til best regulering. Forskning viste da at CO₂ var den beste gassen å bruke for sensorer ventilasjonssystem i bygg med tilstedeværelse, og når ingen andre forurensningskilder var til stede (som for eksempel røykere). De fleste studiene på energibesparelse viste at besparelsen var størst ved bruk av CO₂-kontroll i rom hvor tilstedeværelsen varierte mye og var uforutsigbar. Det ble likevel et problem når det var høy temperatur ute med over-temperatur inne, og det ble utført forskning på kombinerte CO₂- og temperaturfølere. Videre

ble en også oppmerksom på at sensorens plassering var utslagsgivende for måling av konsentrasjonsnivå. Litteratursøket fra 1990 konkluderte med at hvis ventilasjonssystemet kan kontrolleres slik at tilluftsmengden hele tiden tilpasses behovet, kan store mengder energi spares og føre til forbedret luftkvalitet [8]. I 1992 publiserte IEA en rapport kalt «Case Studies» [9], som inneholdt en rekke forsøk på luftforurensning og strategiske løsninger for behovsstyrt ventilasjon. Målet med disse forsøkene var å demonstrere de tekniske mulighetene i ulike bygningskategorier og gi eksempler på hvordan en kunne oppnå energibesparelse og akseptabel luftkvalitet [9]. De viktigste funnene i prosjektene IEA utførte ble i 1992 samlet i en bok kalt «Source Book» [10].

Utviklingen siden den gang har bygget videre på denne forskningen og det utvikles stadig nye strategiske utforminger og styresystem som er med på å redusere energibehovet til ventilasjonsanlegg. Noen av de vanligste reguleringsprinsippene som benyttes i behovsstyrte ventilasjonsanlegg i dag er trykkregulering, regulering ved innlesing av spjeldposisjon og spjeldposisjonsregulering (på engelsk kalt «Static Pressure Reset»). Trykkregulering går ut på å plassere en trykkmåler i hovedkanalen som gir signal til en regulator, programmert til å opprettholde et referansetrykk ved trykkmålerens plassering. Ved hjelp av turtallsregulering endres viftepådraget for å holde det ønskede trykket i hovedkanalen. I grenkanalene er det tilkoblet VAV-spjeld som regulerer luftmengdene avhengig av sensorens signal fra rommet. Ved bruk av regulering ved innlesing av spjeldposisjon er alle spjeld utstyrt med en styrings- og kommunikasjonsenhet, og har en hierarkisk oppbygning, vanligvis på tre nivå - romspjeld i enten minimum eller maksimum posisjon, summering av antall åpne og lukkede spjeld og grenregulator som melder summerte luftmengder til aggregatet som øker eller reduserer viftepådrag. Romspjeldene stilles på forhånd inn for å kunne gi ønsket minimum og maksimum luftmengde i de to posisjonene. Spjeldposisjonsregulering går ut på at VAV-spjeldet for hvert rom kan åpnes og lukkes mellom valgt minimum og maksimum luftmengde. VAV-spjeldene er utstyrt med styrings- og kommunikasjonsenheter, og reguleres etter signal fra sensor i rommet. En hovedstyringsenhet summerer luftmengdene for hvert av romspjeldene, og gir signal til viftens frekvensomformer om å øke eller redusere viftepådraget for å opprettholde trykket i grenkanalen. På denne måten står alltid én ventil i «åpen» posisjon. Spjeldposisjonen bør ikke være helt åpen, for å opprettholde autoritet [11].

Av økonomiske hensyn skal planlegging og prosjektering av ventilasjonsanlegg helst skje raskt, og dette kan gå ut over viktige detaljer som er med på å optimalisere et ventilasjonsanlegg. Det kan være enklere å velge kjente løsninger benyttet i tidligere prosjekter, framfor å tenke nyskapende. Det er dermed avgjørende at det rettes fokus mot avgjørende parametere, for å oppnå et ventilasjonsanlegg med energioptimal drift. I dag finnes det beregningsprogrammer som baserer seg på å modellere ventilasjonsanleggets kanalføringer, for så å utføre beregninger for trykkfall, etc.

Videre har flere ventilasjonsaggregatprodusenter utviklet egne beregningsprogrammer, hvor man kan velge fra deres sortiment og kalkulere blant annet SFP, varmegjenvinning og utføre livssykluskostnadsanalyser. Programvarene i dag gir mange muligheter for ulike beregninger, men det kreves at man gjør beregninger i flere programmer. Det kan dermed være vanskelig å få oversikt til å sammenligne ulike løsninger opp mot hverandre og hva utslagene blir av ulike valg en tar under prosjektering. For å gjøre at de kritiske valgene ikke blir for tidkrevende å ta, bør det utarbeides en enkel beregningsmodell. Denne modellen bør kreve få inndataparametere, som gir de beste løsningene basert på realistiske verdier. Før en slik beregningsmodell kan utvikles, er det behov for å finne fram til hvilke parametere som er viktige å implementere, samt innhente dokumentasjon av virkelige ytelser fra behovsstyrte ventilasjonsanlegg. Det er i dag lite dokumentasjon på hvor optimale ventilasjonsanlegg er etter idriftsettelse, og hvor god behovsstyringen er ved ulike reguleringsprinsipp.

1.1 - HENSIKT

Målet for masteroppgaven er som følger:

Hvilke parametere bør inngå i en enkel beregningsmodell for å velge et energioptimalt, behovsstyrt ventilasjonsanlegg? Parametere for enkel beregningsmodell kartlegges. Videre fremlegges det forslag til verdier som kan benyttes i beregning av SFP ved behovsstyring for revisjon av NS 3031, Tillegg H. Forslagene til verdier til SFP-beregning baseres på dokumentasjon av virkelige ytelser av behovsstyrte ventilasjonsanlegg ved eksisterende bygg.

Følgende punkter dokumenteres, basert på ulike driftsstillinger ved fire bygg:

- Ventilasjonsanleggets reguleringstrykk.
- Ventilasjonsanleggets eksterne trykkfall.
- Strømningsforhold i ventilasjonsaggregatet.
- Fordeling av trykkfall i ventilasjonssystemet.
- Forhold mellom luftmengder og viftens trykkoppbygning.
- Forhold mellom luftmengder og viftenes systemvirkningsgrad.
- Forhold mellom luftmengder og SFP.

På grunnlag av dokumentasjonen gis det forslag til følgende inndata til beregning av SFP til revisjon av NS 3031, Tillegg H:

- Reguleringstrykk
- Dimensjonerende eksternt trykkfall
- Ventilasjonsaggregatets strømningssekspONENT

2 - UTVALG

2.1 - UTVALGTE BYGG

For å kunne gi realistiske forslag til inndata i beregning av SFP ved behovsstyring, ble det utført målinger ved fire bygg med behovsstyrte ventilasjonsanlegg. Under følger beskrivelse av de utvalgte byggene og styresystem, samt erfaringer fra feltmålingene. For ytterligere informasjon om byggene, styresystemene og erfaringer, henvises det til Vedlegg G – Byggbeskrivelser.

2.1.1 - MILJØHUSET GK

Miljøhuset GK er klassifisert som passivhus etter SINTEFs prosjektrapport 42, energimerket A og har BREEAM-klassifisering «Very Good». Bygget ble tatt i bruk 1. Juni, 2012, og har et areal på 13 619 m² BRA over seks plan [12]. Ventilasjonsanlegget består av seks aggregat likt fordelt på byggets deler – A, B og C. De tre delene er delt inn i sør- og nordfasade, slik at et ventilasjonsaggregat leverer luft til hver etasje på sørsiden, og et annet aggregat leverer for nordsiden [13], [14], [15].

Ventilasjonsanlegget som det ble tatt målinger ved, er plassert i bygg C på nordfasaden (360.06).

Behovsstyrt ventilasjon i Miljøhuset GK er av fabrikatet Lindinvent. Denne løsningen består av tilluftsventiler med integrert automatikk, motor, detektor og giver. Ventilen har en detektor som registrerer bevegelse i rommet, og ved bevegelse senkes tilluftsventilen ned og slipper ut mer luft. Videre gir elektronikken i spjeldet et signal til nærliggende grenspjeld som også åpner og gir mer luft [16], [17]. Ventilen inneholder spjeldmotor, innebygget regulator, tilstedeværelsesdetektor, IR (infrarødt lys) for kommunikasjon, luftmengdemåler, temperaturmåler og koblingsboks, ekstern CO₂-føler og fjernstrømsbryter [18].

CMA inneholder programvare for optimalisering av Lindinvent-anlegget. Denne samler inn informasjon fra hver node; luftmengde, romtemperatur, åpningsgrad, tilluftstemperatur, osv. Informasjonen brukes til å optimalisere de tilknyttede ventilene, for å kunne få lavest mulig trykkfall i kanalnettet. CMA kan kommunisere med aggregatet, som gir så lav trykkoppbygning som mulig [19]. Simulering av maksimum og minimum luftmengde kan programmeres via CMA, ved å gjøre innstillinger i kalibreringsmodus. CMA kan da få alle noder tilkoblet tillufts- og avtrekksventiler til å kjøre programmert maksimum og minimum luftmengde [20].

2.1.1.1 – ERFARING FRA FELTMÅLING

Ved å programmere CMA kunne det simuleres full tilstedeværelse (100 %) i bygget der ventilasjonsanlegg 5 og 6 leverer luft. Tre CMA er installert i 1., 3. og 5. etasje, nummerert fra 7 til 9. CMA 7 dekker 1. og 2. etasje, CMA 8 dekker 3. og 4. etasje og CMA 9 dekker 5. etasje. Den andre driftsstillingen (60 %) ble innstilt ved først å sette CMA 8 og 9 til full tilstedeværelse, og CMA 7 til ingen tilstedeværelse. I den tredje og siste driftsstillingen ble CMA 7, 8 og 9 programmert til ingen tilstedeværelse (0 %).

Måledagen ble startet med å gjennomføre måling ved 60 % tilstedeværelse, som tilsvarer ca. 80 % av maksimal luftmengde, sett ut fra frekvensomformerens. Neste driftsstilling var 100 % tilstedeværelse, som utgjorde maksimal luftmengde. Ved disse to driftsstillingene ble målinger utført som planlagt. Da siste driftsstilling med 0 % tilstedeværelse skulle måles, stengte ventilasjonsaggregatet automatisk ned mot null. Det viste seg at ventilasjonsaggregat 5 tok over og at aggregat 6 (hvor målingene ble utført) gikk ned til null. Løsningen ble å programmere CMA 9 til full tilstedeværelse og holde CMA 7 og 8 ved ingen tilstedeværelse. Dette resulterte i 20 % tilstedeværelse og ca. 60 % av maksimal luftmengde. Observasjoner gjort gjennom Lindinvents oversiktsside viste også at kritisk vei flyttet seg.

2.1.2 - AIBEL-BYGGET

Hagaløkkveien 28 (heretter kalt Aibel-bygget) ligger like ved Asker stasjon, og er et av avdelingskontorene til Aibel AS – et serviceselskap innen olje, gass og fornybar energi [21]. Aibel-bygget i Asker ble det første næringsbygget i Norge som ble klassifisert «Very Good» etter miljøstandarden Breeam Nor [22], og ble i 2011 nominert til årets bygg [23]. Kontoret består av to deler, KB1 og KB2, som er koblet sammen med en lukket bro. I bygget KB1 er det totalt 9 ventilasjonsaggregater, hvor det er installert to aggregat i hvert plan fra 1. til 4. etasje, og ett aggregat i 5. etasje. Byggets totale luftmengde er på 58 500 m³/h (6 500 m³/h pr. aggregat). Med en samtidighet på aggregatene på 80 %, utgjør dette en total luftmengde på 46 800 m³/h (5 200 m³/h pr. aggregat) fordelt på 5500 m² [24]. I prosjektet er det tatt utgangspunkt i ett av ventilasjonsaggregatene i bygg KB1, nærmere bestemt del 1 i 2. etasje. Denne delen av bygget består av et åpent kontorlandskap, celle-kontorer, fellesarealer, toalett og teknisk rom. Ventilasjonsaggregatet er av typen Swegon Gold 25 RX.

I fellesarealene er det montert passive ventiler, der luftmengdene reguleres av sonespjeld. Et sentralt avtrekk er plassert i nærheten av teknisk rom, samt avtrekk fra toalett. På celle-kontorer og i åpent landskap er det montert Swegons aktive tilluftsventiler ADAPT Colibri (ADAPT Cb 160). ADAPT Colibri er luftmengdestyrte tilluftsventiler som inngår i Swegons WISE-system. Luftmengdene for hver ventil styres av et motorstyrt spjeld som er plassert ved inngangen til plenumskammeret. Inne i ventilen er det plassert en regulator som inneholder børverdier for luftmengde, styrefunksjoner og temperatur- og bevegelsessensorer. Temperatursensoren styrer lufttilførselen for å opprettholde den ønskede temperaturen i rommet, som kan senkes ved fravær som registreres av bevegelsessensoren [25].

I Aibel-bygget er Swegons kommunikasjonsenhet Super WISE installert. Det er plassert en trykkføler i trykkammer, for måling av statisk trykk ca. 2/3 ut i grenkanalen fra grenspjeld på både tillufts- og avtrekksside. Viftepådraget styres for å holde henholdsvis 40 Pa og 50 Pa i grenkanalene [26], [24]. Hvis spjeldet står i åpen posisjon, sender systemoptimatoren et nytt settpunkt for trykket i grenkanalene som er høyere enn verdien som viften jobber mot [26], [24]

2.1.2.1 – ERFARING FRA FELTMÅLING

Det ble først forsøkt å sette ventilasjonsaggregatet i en ønsket driftsstilling ved manuelt å stille inn luftmengden på aggregatet via medfølgende håndholdt terminal. Dette resulterte i at spjeldene ved tilluftsventilene strupte, ettersom at rommet ikke hadde behov for denne luftmengden. Det oppsto støy fra ventilene, og det ble straks klart at det måtte løses på en annen måte. Det kom fram at det ville være meget tidkrevende å stille hvert enkelt rom til en ønsket luftmengde, og løsningen ble å stille anlegget i ulike, pre-definerte driftsstillinger: Maksimum og minimum luftmengde med tilstedeværelse og minimum luftmengde uten tilstedeværelse. I disse driftsstillingene leverer ventilasjonsanlegget luft slik det ble innregulert.

Ved måling i teknisk rom ble en nødt til å stoppe ventilasjonsaggregatet flere ganger under målingene. Dette kom av at alle aggregatets tilkoblingspunkter for statisk trykkmåling er plassert på innsiden av aggregatet, og det gjorde at vi måtte stoppe aggregatet mellom hver omkobling. Start og stopp av aggregatet ble utført gjennom manuell styring med håndterminal. Ettersom at det ikke var noen trykkuttak på utsiden, ble det benyttet en kombinasjon av stiv plastslange (som lå i dørklemmen) og silikonslanger på hver av endene.

Måling av vifteeffekt viste seg å være vanskelig å utføre, ettersom at el-tavla var integrert i aggregatet. Løsningen på dette ble å måle ventilasjonsaggregatets totale effekt (effekt fra begge vifter og styrestrøm) ved hoved-tavla. Deretter ble styrestrømmen målt ved aggregatet, slik at denne kunne trekkes fra målingen ved hovedtavla.

2.1.3 - NYDALEN VIDEREGÅENDE SKOLE

Skolen er eid og bygget av Avantor, ferdigstilt og offisielt åpnet 22. august, 2011 og Undervisningsbygg er leietaker for Nydalen Videregående skole. Bygget har et BTA på 14 100 m² og har energiklasse B [27]. Det er installert 11 ventilasjonsanlegg i bygget, og disse varierer fra 1900 m³/h (garasje) til 31 000 m³/h. Bygget er delt inn i tre deler over fire plan og underetasje – del 1, 2 og 3. Aggregatet som er valgt i forsøket er 360.11. Dette ventilasjonsaggregatet dekker del 1, plan 2 til 4, og har en dimensjonerende kapasitet på 28 440 m³/h. Aggregatet dekker primært undervisningsrom med behovsstyring. Ventilasjonsanleggene er dimensjonert for å kunne klare en utvidelse på ca. 15 % [28]. Aggregatet består av to tilluftsvifter, to avtrekksvifter og to roterende varmevekslere. Styresystemets SD-anlegg er levert av Siemens og er basert på undersentraler av typen FX. Disse styrer hver sine soner/rom, og er koblet via N2-bus mot sin egen nettverkskontroller (NAE), med programvaren MSEA. MSEA er programvaren som styrer, regulerer og overvåker det tekniske anlegget i bygget, herunder ventilasjon. Romreguleringen styres av typen Johnson Control gjennom den digitale undersentralen FX. Til denne er det tilkoblet CO₂- og temperaturføler, bevegelsesføler, lysbryter, ventil for varme og ventilasjonsspjeld (VAV). VAV-spjeld går i en minimum- eller maksimumposisjon, alt etter behov registrert av CO₂- og temperaturføler. Avtrekkspjeld er slavet opp mot tilluftsspjeld i samme sone/rom [29]. Ved minimum- eller maksimum-signal vil regulatoren stille seg inn tilnærmet ønsket luftmengde via tilbakemelding fra målestasjonen. Regulatoren vil derfor gi ønsket luftmengde uavhengig av kanaltrykket [30].

2.1.3.1 - ERFARING FRA FELTMÅLING

I tiden målingene på ventilasjonsanlegget ble utført, var det få personer til stede i bygget på grunn av vinterferie. Ventilasjonsanlegg 360.11 ble dermed startet opp slik at tester og målinger kunne gjennomføres. Å få aggregatet til å gå fast i en konstant driftsstilling kunne ikke gjennomføres. Grunnen til dette var at det ville ta lang tid, ettersom at en da ble nødt til å gå inn på SD-anlegget og kontrollere flere parameter. Grunnet meget lite tilstedeværelse, kunne auto-modusen ansees som tilnærmet konstant, og ventilasjonsanlegget ble dermed kun testet i én driftsstilling. Da ulike målinger ute i anlegget skulle utføres, ville ikke ventilasjonsanlegget reagere på bevegelse så lenge lysbryterne ikke ble slått på. Etasjehøyden på 4,4 m førte til at det måtte benyttes to trappestiger i ulike størrelser for å komme til ventilasjonskanalene over himling, noe som gjorde målingene langt mer tidkrevende å utføre.

2.1.4 - FORSKNINGSPARKEN

Forskningsparken utgjør totalt 57 000 kvm og er arbeidsplass til om lag 2000 personer, i alt fra små til store selskaper og forskningsinstitusjoner. Hele bygget er (i skrivende stund) ikke tatt i bruk ennå, og i april 2013 står lokalene i 8. etasje klare [31]. Bygget er delt inn i flere ulike seksjoner, og det er ventilasjonsanlegget som dekker «Hus 8» fra 3. til 7. etasje som målinger er utført på i dette prosjektet. Ventilasjonsaggregatet er plassert i teknisk rom i 8. etasje og har en kapasitet på 50 000 m³/h.

Ventilasjonsanlegget styres av den norskutviklede, patenterte løsningen Digital Behovstilpasset Ventilasjon (DBV). Styringen er bygget opp hierarkisk, med styring ved romspjeld, grenspjeld og ventilasjonsaggregat. Romspjeldene kan stilles i to stillinger (maksimum og minimum), med 2-posisjons spjeldmotorer fra Belimo. Spjeldet er koblet til kontroll- og kommunikasjonsenheten AS10, som styrer tilluftsspjeldets motor. En kombinert bevegelses- og temperatursensor er tilkoblet AS10. Ved møterom og større kontorrom med flere arbeidsplasser, er det installert kombinert temperatur- og CO₂-sensorer, samt bevegelsesdetektorer. Hver kommunikasjonsenhet kalt CVaV kan tilknyttes 12 AS10. CVaV plassert ved grenspjeldet summerer til enhver tid luftmengdene som hver av romspjeldene ber om, basert på hvilken av de to posisjonene spjeldene står i. Ved grenspjeldene er det montert VAV-spjeld av typen Trox VAV RC-0, med målekors for måling av luftmengden i grenkanalene. Grenspjeldposisjonen styres for å gi den summerte luftmengden, ved at CVaV'en gir VAV-regulatoren et settpunkt i form av et analogt 0 – 10 V signal. I Forskningsparken er det sentralt avtrekk for flere tilluftsgrener, slavet opp mot tilluftsmengdene. Gjennom LonWorks BUS melder samtlige CVaV'er som er tilknyttet ventilasjonsaggregatet sine luftmengder til aggregatets CVaV, som summerer luftmengdene. Dette er aggregatets nye luftmengdesettpunkt, og et 0 – 10 V-signal sendes fra aggregatets CVaV til frekvensomformereren og viften øker eller reduserer viftepådraget [32].

2.1.4.1 – ERFARING FRA FELTMÅLING

Ettersom at 8. etasje ikke var tatt i bruk, tilsvarte den totale luftmengden om lag 80 % av luftmengden anlegget er dimensjonert for. Fra SD-anlegget ble det forsøkt å åpne opp alle grenspjeld og samtlige rom ved å be om maksimal luftmengde. Det oppsto et problem med å få kontakt med spjeldene. En mulig forklaring på at dette problemet oppstår kan være støy fra strømmettet, som kan påvirke kommunikasjonen til ventilasjonsaggregatet. I el-tavlen i teknisk rom er det plassert en frekvensomformer for et «møllehjul», og støy fra denne viser seg å skape kommunikasjonsproblemer med spjeldene. I tillegg er det ute i anlegget lagt utskjermede kommunikasjonskabler for

ventilasjonsanlegget av typen UTP (Unshielded Twisted Pair) sammen med sterkstrømskabler (230 V). Avstanden mellom svak- og sterkstrømskablene er liten ut fra el-tavlen og på kabelbroer i anlegget, og dette kan også være en kilde til støy. Frekvensomformerer for møllehjulet ble slått av, og det lyktes da å opprette kontakt med spjeldene. Ved vifteinnløp (venturi) er det ikke montert statisk trykkuttak, og dermed kunne det ikke måles total luftmengde på denne måten. Løsningen ble da å måle trykkdifferansen ved måleblendene for samtlige tilluftsgrenspjeld. For å stille ventilasjonsanlegget i andre driftstillinger, viste det seg at dette ville ta mye lengre tid enn først antatt. For å få dette til, ville man bli nødt til å endre luftmengdesettpunktet for hvert enkelt spjeld. Dette ble ikke aktuelt å utføre, og dermed ble det kun utført måling ved én driftstilling ved Forskningsparken.

3 - METODE

3.1 - TRYKKMÅLING

3.1.1 – BENYTTET MÅLEINSTRUMENT

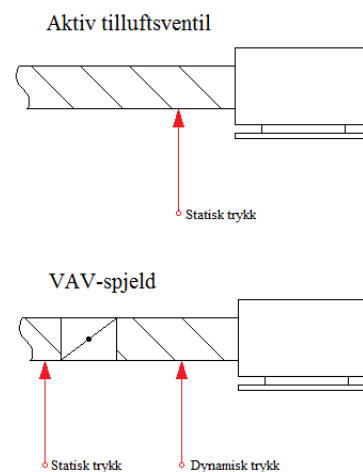
Mikromanometeret som er benyttet er av typen DPM TT 570SV, og har en målekapasitet på opptil 7,5 kPa. Det benyttes mikromanometer med høy kapasitet, for å forsikre at trykket som måles ikke overskrider kapasiteten. Det digitale manometeret viser trykkendringer på 0,1 Pa. Ettersom at det er benyttet et digitalt manometer med middelverdimåling med et tidsintervall høyere enn 0,1s (det er benyttet 1,0 s), er laveste aksepterte måletrykk 3 Pa [33]. Instrumentet har fabrikkinnstilt nullstiller med et intervall på 60 sekunder, men denne kan om ønskelig endres manuelt [34]. Under måling er 60 sekunders intervall benyttet.



Figur 1 DPM TT570SV

3.1.2 – BESTEMMELSE AV MÅLEPUNKT FOR REGULERINGSTRYKK

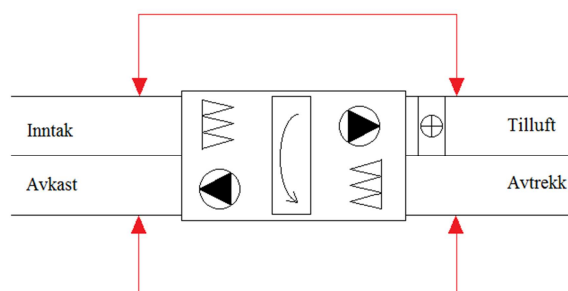
I ventilasjonsanlegg med konstant luftmengdetilførsel bestemmes kritisk vei ved å finne ventilen som etter innregulering har størst åpningsvinkel på spjeldet. Ved behovsstyrt ventilasjon endres luftmengdetilførselen ofte til de ulike sonene, og dette gjør at også kritisk vei vil endre plassering i ventilasjonsanlegget over tid. For å prøve å finne kritisk vei i et ventilasjonsanlegg hvor den stadig er i endring, ble det valgt å måle reguleringstrykket ved ulike ventiler. Det ble tatt utgangspunkt i å måle reguleringstrykk et stykke ut i anlegget, ettersom at det dynamiske trykktapet vil bli større dess lengre ut i anlegget luften transporteres. Der det ikke var installert aktive tilluftsventiler, ble det i tillegg målt dynamisk trykkfall som vist nederst på Figur 2. Reguleringstrykket på avtrekkssiden er målt etter siste VAV-spjeld som er plassert lengst unna ventilasjonsaggregatet. For anlegget ved Aibel-bygget, der det er benyttet «static pressure reset», ble reguleringstrykket målt ca. 2/3 ute i hovedkanalen. Dette er avstanden som produsent oppgir som registreringspunkt og dette er også bekreftet av prosjekteringsutførende.



Figur 2 Målepunkt for måling av reguleringstrykk for aktiv tilluftsventil og VAV-spjeld

3.1.3 - BESTEMMELSE AV EKSTERNT TRYKKFALL

For å finne trykkfallet i kanalsystemet, er det statiske trykkfallet internt i aggregatet målt. Det er tatt utgangspunkt i at det interne og eksterne trykkfallet utgjør omtrent det samme [35]. For å måle internt trykkfall, er det målt statisk trykk i kanalene etter viftene på tilluft- og avkastsiden, samt statisk trykk i kanalene før aggregatet på inntak- og avtrekkssiden (se Figur 3). Det dynamiske trykkfallet i aggregatet er neglisjerbart på grunn av stort tverrsnittsareal.



Figur 3 Målepunkter for eksternt trykkfall på tillufts- og avtrekkssiden

3.1.4 - STATISK TRYKKMÅLING I KANAL

Det statiske trykket i en kanal måles ved å bore en liten åpning i kanalveggen, feste en liten måleplugg i hullet, som igjen kobles på en silikonslange festet til et manometer. Diameteren på åpningen, som her blir pluggens innvendige diameter, bør være mellom 0,5 og 3 mm. Større diametere vil kunne gi et høyere målt trykk enn hva som opptrer i kanalen, og en mindre diameter kan lett tettes igjen av smuss fra luften [36].

Pluggen ble plassert så vidt innenfor kanalveggen, men så lang inn at den gikk forbi graden som oppstod når boret bøyd inn i kanalveggen. Når pluggen stikkes innenfor kanalveggen kan den påvirke strømningsbildet, men metoden er et godt alternativ å benytte der man ikke kan kontrollere graden på innsiden. Alternativt kan et Prandtl-rør benyttes for å måle det statiske trykket (se kapittel 3.1.5 - Dynamisk trykkmåling i kanal).



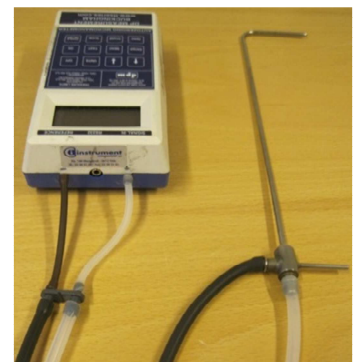
Figur 4 Måling av statisk trykk i kanal.



Figur 5 Kobling - Statisk trykkmåling.

3.1.5 - DYNAMISK TRYKKMÅLING I KANAL

For måling av totaltrykk, statisk trykk og *dynamisk trykk*, ble Prandtl-rør benyttet (Engelsk: Pitot-static tube). Røret kobles til et manometer med silikonslanger, hvor man kan lese av trykkdifferanse. Prandtl-røret består av et dobbelt-rør og det indre røret er åpent for strømning ved tuppen, hvor totaltrykket måles. Det ytre røret er tett ved tuppen av røret, men har flere hull på siden, og her måles det statiske trykket. Hvis slanger fra manometer kobles til både indre og ytre rør måles det dynamiske trykket, hvor trykkuttak i bunnen gir totaltrykket og trykkuttak på siden gir det statiske trykket. [37]



Figur 6 Kobling - Dynamisk trykkmåling.

3.1.6 - KRAV TIL MÅLEAVSTANDER OG UTFØRELSE

For å sikre mest mulig nøyaktig måling ved bruk av Prandtl-rør, er målepunkter og måleutførelse viktig å vektlegge. Boken «Metoder för mätning av luftflöden i ventilationsinstallationer» [33] gir anbefalte metoder for måling av luftstrømning.

Måleprosedyre:

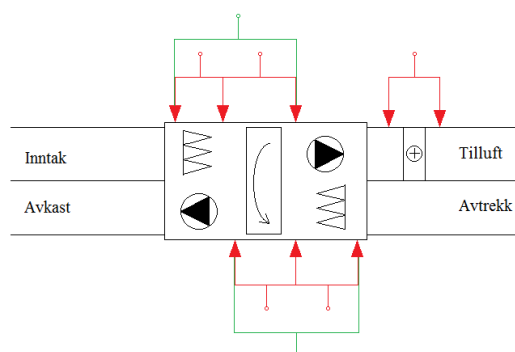
1. Først bestemmes hastigheten i målepunktet, og måling med Prandtl-rør bør ikke skje ved hastigheter under 2,5 – 3 m/s.
2. Deretter måles det dynamiske trykket i sentrum av tverrsnittet.
3. En må finne ut hvor største dynamiske trykk er.
4. Trykkmaksimum må være plassert lengre fra kanalveggen enn 0,1 ganger kanaldiameteren, og det maksimale dynamiske trykket må være mindre enn 2 ganger det dynamiske trykket i sentrum (det må heller ikke oppstå tilbakestrømning).
5. Hvis ikke begge kriteriene i punkt 4 oppfylles, bør man velge et nytt målepunkt.
6. Hvis ingen målepunkter oppfyller kriteriene, bør ikke luftmengdemåling tas med Prandtl-rør.
7. Etter endt måling, tettes hullene igjen med plastpropper.

Videre i boken er plassering av prandtl-rør beskrevet med medfølgende målefeil: Ved måling i sirkulære kanaler skal måling skje vinkelrett og horisontalt (målefeil 4 %). Hvis ikke dette er praktisk mulig, justerer man målepunktet med 45° (målefeil 6 %).

Det er ulike krav til antall målepunkter i kanaltverrsnittet avhengig av kanaldimensjon [33].

3.1.7 - STATISK TRYKKMÅLING OVER KOMPONENTER I AGGREGAT

For å beregne strømningskoeffisient i ventilasjonsaggregatene, ble det målt trykkfall over hver av komponentene (se Figur 7). For å måle trykket bak vifta, ble det koblet en slange på ved innløpet til vifta. For å måle trykkfallet over roterende varmeveksler, brukes en smal og stiv slange som ikke kan klemmes (omtrent 15 cm lang). Man åpner moduldøren og plasserer to slanger inn sideveis på hver side av rotoren. De stive slangene kobles på myke silikonslanger på utsiden av aggregatet som igjen kobles til trykksføleren. Døren lukkes og trykket leses av. [38]



Figur 7 Målepunkt for trykkfall. Grønt viser trykkfallsmåling for strømningskoeffisient i aggregatet. Rødt viser trykkfallsmåling for hvert enkelt komponent.

Man kan måle trykkfall med trykkmåler på to ulike måter og begge metodene ble benyttet:

1. Koble seg til med to slanger på hver side av en komponent og måle trykkdifferansen (differensialtrykk).
2. Benytte én slange og registrere trykkdifferansen mellom dette trykket og trykket i rommet (absoluttrykk).

De to metodene skal teoretisk sett gi like resultater, men i praksis er det ofte et avvik. Ved avvik, er trykkfallene sammenlignet med komponent-data fra produsent gjennom simuleringsprogram.

3.1.8 - TRYKKMÅLING FOR BEREGNING AV LUFTMENGDE

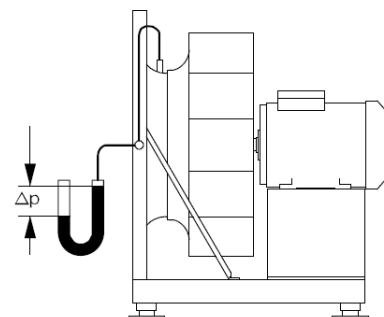
For måling av luftmengde ved vifteinnløp gjelder samme prinsippet som for måling over måleblende. Luftmengden måles indirekte ved å måle trykkfallet som oppstår som følge av økt hastighet ved et innsnevringsspunkt relativt til et målepunkt før innsnevringen [37]. Før viftene i et ventilasjonsaggregat er det vanligvis montert et venturi, for å måle luftmengde over viftene. Metoden går ut på å måle det statiske trykket i vifteinnløpet der diameteren er minst. Det statiske trykket måles med fire symmetrisk plasserte trykkuttak, som kobles sammen med slanger til ett trykkuttak. Differansen mellom dette statiske trykket og det statiske trykket foran innløpet, i et punkt der hastigheten er lav, brukes for å beregne luftmengden. Koeffisienten (k-verdien) for hvert venturi fås fra leverandør [33].



Figur 8 Parallellkobling med T-stykke.

Der det er montert trykkuttak ved venturi, ble det tilkoblet plast- eller silikonslanger mellom tapper på utsiden av aggregat og aggregatets trykkmåler. Når disse kobles fra, registrerer ikke lenger trykkmåleren trykkfall over venturi, og dette førte til at viftepådraget økte kraftig. For å unngå dette problemet, ble det benyttet et T-stykke som vist på Figur 8.

Denne koblingen bør gjøres raskt, for å unngå for stor økning av viftepådraget. Det vil da ikke ta lang tid før viften stabiliserer seg igjen. For å utføre koblingen raskest mulig, ble T-stykket på forhånd koblet på slangen til manometeret, samt den lille slangen på



Figur 9 Prinsipp, trykkmåling ved venturi [3]

venstre side på Figur 8. Deretter løsner man trykkfølerens slange (den gjennomsiktige slangen på bildet) fra den sorte tappen, kobler den lille slangen på tappen og kobler så trykkfølerslangen på T-stykket.

Ved tilfeller der det ikke var mulig å måle trykkfall over venturi i ventilasjonsaggregat, måles trykkfallet over målekors for samtlige grenspjeld som er tilknyttet ventilasjonsaggregatet. Der det var tilluftsventiler med konstant tilluft som ikke var koblet til noe grenspjeld, ble hastigheten i kanalen før ventilen målt (se kapittel 3.2 - Hastighetsmåling). Luftmengden er da beregnet ved å benytte følgende formel for sirkulært tverrsnitt [33]:

$$q = v * A = v * \frac{\pi * d^2}{4} \quad \text{Formel 1}$$

Hvor

q = Luftmengden [m^3/s]

v = Lufthastighet i ventilasjonskanal [m/s]

A = Ventilasjonskanalens tverrsnittsareal [m^2]

d = Ventilasjonskanalens diameter [m]

Som et supplement registrerte vi i tillegg luftmengder fra SD-anlegg, for å kontrollsjekke utførte målinger.

3.1.9 - METODEFEIL

Statisk trykkmåling i kanal og ventilasjonsaggregat:

Metodefeil for hastighetsmåling med Prandtl-rør er i «Metoder för mätning av luftflöden i ventilationsinstallationer» [33] oppgitt til å være 4 %. Ettersom at det dynamiske trykket som måles er lik halve hastigheten i andre, utgjør metodefeilen $v(4^2 + 4^2) = 8 \%$ (Beregnet etter Formel 5).

Ettersom at det dynamiske trykket måles som totaltrykket minus det statiske trykket i kanalen, vil feilen ved statiske trykkmåling være mindre enn det dynamiske. Holdes Prandtl-røret helt parallelt med strømningsretningen vil det statiske trykket måles omtrent konstant i senter av kanaltverrsnittet. Det dynamiske trykket vil i større grad kunne påvirkes av bend og avgreninger, da ulike strømningsbilder kan føre til ujevnt hastighetsprofil. Det antas dermed at metodefeilen for den statiske trykkmålingen i kanal og i aggregat utgjør 2 % av de 8 % for dynamisk trykkmåling.

Punktvis hastighetsmåling med Prandtl-rør [33]:

- Sirkulært tverrsnitt: 4 – 6 % (For metoden som er benyttet i prosjektet (tilfelle A) er metodefeilen lik 4 %)
- Rektangulært tverrsnitt: 4 %

Differensialtrykkmåling over vifteventuri [33]:

- Totalluftmengdemåling i vifteinnløp: 5 % (4 punkt, blandingslengden $L = 10 * D_h$)
10 % (4 punkt, blandingslengde $L = 5 * D_h$)
- Luftmengdemåling ved målekors kombinert med spjeld [33]:
Målekors som er kombinert med spjeld har ofte en større målefeil i forhold til målekors som er montert kun for luftmengdemåling, og kommer av at strømmingen blir forstyrret av spjeldet. Generelt gjelder 5 %.

3.2 - HASTIGHETSMÅLING

3.2.1 - BENYTTET MÅLEINSTRUMENT

For måling av lufthastighet i ventilasjonskanaler er det benyttet et termisk anemometer av typen Swema 3000 MD. Dette instrumentet er i denne sammenheng brukt for å avlese gjennomsnittlig lufthastighet i kanaltverrsnittet, samt lese av opptredende temperatur i kanaltverrsnitt. Det tilkobles en Swema SWA 31, som er en teleskopstang med en liten metalltråd som varmes opp av luft som passerer. Trådens oppvarming konverteres til hastigheten i kanalen, og nedenfor befinner det seg en temperaturføler som angir lufttemperaturen i kanalen. Swema ble under måling satt til funksjonen AS, som gjør at man får opp en gjennomsnittlig hastighetsmåling på skjermen [39].



Figur 10 Swema 3000 MD

3.2.2 – MÅLING AV LUFTHASTIGHET

Lufthastigheten måles, i likhet med dynamisk trykkmåling med Prandtl-rør, ved flere målepunkter i kanaltverrsnittet. Plassering og korrigering utføres tilsvarende som for Prandtl-rør, beskrevet i «Metoder för mätning av luftflöden i ventilationsinstallationer» [33].

Punktvis hastighetsmåling med termisk anemometer [33]:

Metoden går ut på at strømmingen beregnes fra en serie hastighetsmålinger i kanaltverrsnittet. Varmetrådanemometeret skal være kalibrert ved den temperaturen som råder i kanalen. Er

kalibreringen kun utført ved 20°C og målingen skjer ved 30°C, kan man få en feil på 5 – 10 %. Termisk anemometer bør ikke benyttes for å bestemme luftmengde ved lufthastigheter under 0,5 m/s.

Måleprosedyre [33]:

1. Mål hastigheten i sentrum av tverrsnittet.
2. Finn ut hvor største hastighet er og noter størrelsen og plasseringen av dette.
3. Hvis hastighetsmaksimum er plassert lengre fra kanalveggen enn $0,1xD$, og den maksimale hastigheten er mindre enn $1,4 \times$ hastigheten i sentrum. Det må heller ikke oppstå tilbakestrømning.
4. Hvis ikke begge kriteriene oppfylles, bør man velge et nytt målepunkt.
5. Hvis ingen målepunkter oppfyller kriteriene, bør ikke luftmengdemåling tas med termisk anemometer.
6. Etter endt måling, tettes hullene igjen med plastpropper.

Metodefeil:

Punktvis hastighetsmåling med termisk anemometer [33]:

- Sirkulært tverrsnitt: 4 – 6 %
- Rektangulært tverrsnitt: 4 %

3.3 - TEMPERATURMÅLING

3.3.1 – BENYTTET MÅLEINSTRUMENT

For dette prosjektet er det valgt å benytte et termoelement på grunn av den raske responstiden på målingen, som følge av liten termisk masse som skal varmes opp eller kjøles ned. Dette instrumentet er det vanligste å benytte for måling i fluidmekanikk, blant annet på grunn av den robuste konstruksjonen og at den har det videste spekteret sammenlignet med andre termometere.

Termoelementet består av to ulike metalledninger som er koblet sammen på to punkter. Den ene sammenkoblingen følger på temperaturen i det aktuelle målepunktet, mens det andre sammenkoblingspunktet virker som en referanseverdi med en kjent, konstant temperatur.

Spenningsforskjellen mellom de to sammenkoblingene avhenger kun av materialene som er brukt og temperaturen, og kan dermed brukes for å måle temperatur [36]. Termoelementet er av typen Kane-May KM3002.

3.3.2 – MÅLING AV TEMPERATUR OG BAROMETERTRYKK

Termoelementet ble benyttet til å måle temperaturen før vifteinnløpene (venturi), for å korrigere luftens densitet, relativt til luftens temperatur. For densitetskorreksjon i kanaler ute i anlegget hvor lufthastigheten måles, benyttes temperaturføleren som følger med Swema 3000 MD. Der det ble benyttet Prandtl-rør, ble termoelementet brukt. Data for barometertrykk hentes fra Meteorologisk Institutt framfor å benytte følere, da disse ofte kan gi feilaktige målinger på grunn av uforutsette påvirkninger.



Figur 11 Måling av temperatur før vifteinnløp.

Luftens densitet i kanal korrigeres etter følgende formel [33]:

$$\rho = 1,293 * (B/1013) * (273/(273 + u)) \quad \text{Formel 2}$$

Hvor

ρ = Luftens densitet [kg/m³]

B = Lufttrykket [hPa]

u = Lufttemperaturen [°C]

3.4 - FEILKORREKSJON

3.4.1 - FEILKILDER OG KORREKSJONER VED MÅLING AV LUFTHASTIGHET OG TRYKK

Feil i måledata kan inndeles i grove, systematiske og tilfeldige feil. Grove feil kan oppstå som resultat av blant annet stress, tretthet og dårlig belysning. Systematiske feil vil si at hver målte verdi avviker tilsvarende fra den reelle verdien. Denne feilen kan fjernes ved å korrigere med en fastsatt korreksjon gjennom utført instrumentkalibrering:

$$\text{Oppmålt verdi} = \text{Avlest verdi} + \text{korreksjon for instrumentet} \quad \text{Formel 3}$$

I kalibreringsbeviset for hvert enkelt måleinstrument, er måleavvik oppgitt fra målinger utført under stabile forhold i laboratorium, og ved å benytte metode med lav feilmargin.

Tilfeldige feil er feil ved hver enkelt måling som ikke kan påvises å ha noen sammenheng med andre målinger, og kan komme av et antall små instrumentfeil og raske, ukontrollerte variasjoner i omgivelsene. Denne typen feil deles opp i instrumentfeil, metodefeil og avlesningsfeil [33].

Videre skal måleverdiene korrigeres med hensyn til metoden som er benyttet [33]:

$$\text{Riktig verdi} = (\text{Oppmålt verdi}) * (\text{korreksjonsfaktor for metoden}) \quad \text{Formel 4}$$

For måling med Prandtl-rør og termisk anemometer, korrigeres det for luftens temperatur og barometertrykk, samt for kanalens form og dimensjon.

3.4.2 – BEREGNING AV MÅLEFEIL

Den sannsynlige målefeilen beregnes etter følgende formel [33]:

$$m_m = (m_1^2 + m_2^2 + m_3^2)^{1/2} \quad \text{Formel 5}$$

Hvor

m_m er sannsynlig målefeil [%]

m_1 er instrumentfeil [%]

m_2 er metodefeil [%]

m_3 er avlesningsfeil [%]

Instrumentfeil oppgis av produsent. Metodefeilen vil variere i forhold til måleposisjon og avstand med rett strekk før og etter målepunkt. Avlesningsfeilen kan sees bort ifra for DPM TT 570SV og Swema 3000 MD, ettersom at måleinstrumentene viser middelvei med måleintervall høyere enn 0,1 s [33]. Termoelementet KM 3002 har en avlesningsfeil som tilsvarer en halv enhet i siste siffer [33]. Dette gir en avlesningsfeil på 0,05°C, da siste siffer er 0,1°C.

SINTEF Byggforsk har utført en rekke tester av ulike målemetoder, hvor det er dokumentert systematisk målefeil og standardavvik opp mot en måling utført i en BAAS-målestasjon som gir meget lav målefeil. I tillegg til å beregne en teoretisk total måleusikkerhet, er det benyttet en gjennomsnittlig standardavvik fra fire av forsøksmålingene. I videre beregninger er SINTEF Byggforsks måleusikkerhet benyttet for måling i 5 punkt med Prandtl-rør og termisk anemometer, ettersom at dette gir mer realistiske måleusikkerheter enn en teoretisk utregning. [40]

Standardavviket er da beregnet etter følgende formel [41]:

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

Formel 6

Hvor

S = Standardavvik

n = Antall måleverdier

x_i = Hver enkel måleverdi

$\bar{x}$ = Middelerdien av måleverdiene

Ved beregning av en sammensatt målefeil, der det inngår ulike faktorer med respektive målefeil, summeres målefeilen tilsvarende som i Formel 5.

3.5 - EFFEKTMÅLING

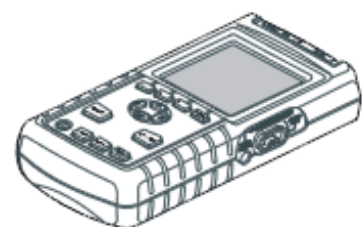
3.5.1 – BENYTTET MÅLEINSTRUMENT

Til måling av effekt er det benyttet en trefase-nettanalysator fra Chauvin Arnoux av typen CA 8334. Instrumentet kan brukes til å diagnostisere både en-fase- og tre-fase-nett, samt effekt. Pakken inneholder tre strømtenger og fire målepinner, som kan kobles til instrumentet. Ved måling av TN-nett kobles også nøytrallederen til. Skjermen viser grafiske resultater med farger, samt tallresultater. Strømtangen måler fra 0 – 6000 A, vekselspanning 0-960 V (nøytralleder 0 – 480 V), harmoniske strømmen, utregning av effekt (kW/kVA/kvar), effektfaktor, viserdiagram for strøm og spenning, med mer. [1]



Figur 12 CA8334 nettanalysator [1]

For måling av styrestrøm ved Aibel-bygget, er det benyttet en effektanalysator av typen Fluke 43. Denne er optimalisert på 50 Hz grunnfrekvens. Instrumentet kan med en strømtang og to målepinner gi resultat som; strøm, spenning, harmoniske svingninger, transienter, ohm, effekt, med mer. Den kan måle spenning opp til 1250 V, strøm opp til 1250 kA og effekt opp til 1,56 GW. [2]

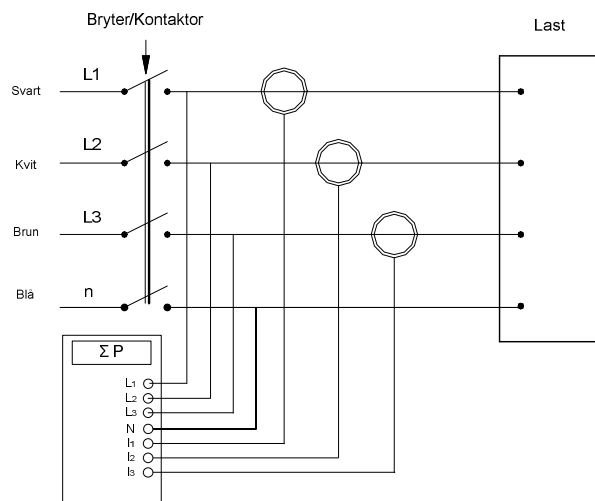


Figur 13 Fluke 43 effektanalysator [2]

3.5.2 – TREWATTMETERMETODEN, EFFEKTMÅLING I TN-NETT

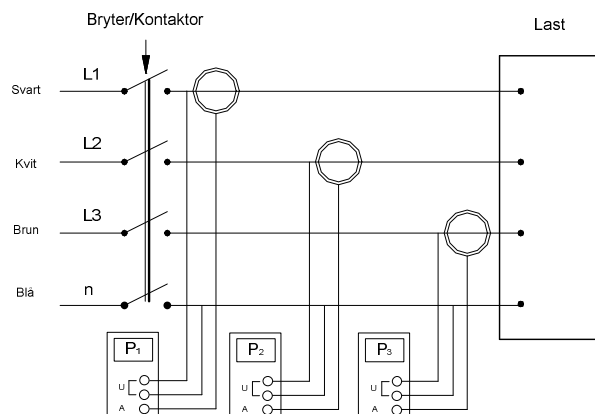
En tre-fase-nettanalysator har tilkobling for å måle spenningene og strømmen i alle tre fasene samtidig. Ved én enkelt måling kan en da fastsette effekten som forbrukes av lasten.

Koblingsskjemaet vil her være som vist i Figur 14. [1]



Figur 14 Figuren viser tilkobling av en analysator til et tre-fase-nett. N-lederen blir tilkoblet som illustrert (den stiplede linja).

I et TN-nett er nøytrallederen ført fram sammen med tre faseledere. Utføring av aktiv effektmåling gjøres som illustrert i Figur 15. Summen av disse tre wattmeterne, $P_1 + P_2 + P_3$, utgjør levert effekt til lasten. Trewattmetermetoden gjelder både for balansert og ubalansert last. Ettersom at det benyttes en CA 8334, gjøres ikke hver av målingene med tre måleinstrumenter, men alle målingene registreres av ett instrument. [42]



Figur 15 Effektmåling i TN-nett. De tre wattmeterne illustrerer hver av målingene CA 8334 utfører.

3.5.3 - WATTMETERMETODEN

Ved å benytte wattmetermetoden ble den aktive effekten (W) som utstyret trekker målt. Et wattmeter kan måle både strøm, spenning og effektfaktor ($\cos \varphi$) tilknyttet lasten samtidig. Det vil da kunne avleses effekt på instrumentet tilsvarende den teoretiske tilnærmingen [42]:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad \text{Formel 7}$$

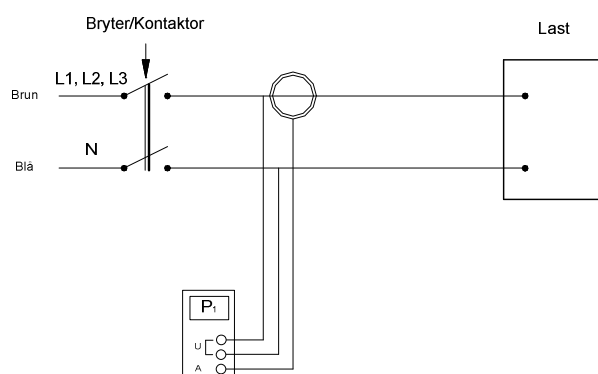
Hvor

P = Effekt [W]

U = Spenning [V]

I = Strøm [A]

$\cos(\varphi)$ = effektfaktor



Figur 16 Wattmetermetoden tilknyttet en en-fase last.

Komponentene tilknyttet dette instrumentet er målepinner og en strømtang. Målepinnene blir tilkoblet hver sin fase og strømtanga kobles til den ene fasen. Verdien som leses av er den aktive effekten. Ved Aibel-bygget, hvor ventilasjonsaggregatets styrestrøm er målt, er wattmetermetoden benyttet. Da måles strømmen som går til ventilasjonsaggregatets styrestrøm, samt spenningen på lederen som er koblet opp mot styrestrømmen.

3.5.4 - MÅLEAVVIK

For beregning av måleavvik for effektmålingene er metoden "Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)" [43] benyttet. Dette er en anerkjent metode for å beskrive hvordan et resultat skal presenteres med måleavvik. Metoden beskriver en framgangsmåte der det tas med inngangsverdier og andre parametere. Resultatene fra disse verdiene har avvik, og må korrigeres slik

at de kommer med når en regner ut det totale avviket. Med måleavvik og målefeil kjenner en ikke den sanne verdien, men man kan da finne en serie med verdier, og her er det sannsynlig at den sanne verdien ligger innenfor [43].

Det er i dette prosjektet benyttet type B-evaluering, ettersom at det er tatt få målinger, og man ikke kan utvikle statistiske grunnlag. Grunnlaget er da hentet fra andre kilder, som kalibreingsbevis eller tekniske spesifikasjoner fra produsent. Da oppgis den statistiske fordelingen for et instrument eller metoden, og dermed kan standardavviket beregnes. Det kan ikke sies at type B-evaluering er mer urealistisk enn A-type, som går ut på å ta flere målinger som danner et statistisk grunnlag. Dette er to statistiske grunnlag eller avvik med ulike kilder. Registrerte effekter korrigert for systematisk målefeil fra kalibrering av måleinstrumentene. Måleavviket beregnes med følgende formel, gjennom å ta roten av summen av alle avvikene som inngår i effektmålingen opphøyd i andre [43]:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$$

Formel 8

3.6 - ANALYSE

3.6.1 – BEREGNING AV STRØMNINGSEKSPONENT

Følgende formel kan benyttes for tilnærmet å beregne trykkfallet i ventilasjonsaggregatet [35]:

$$\Delta p_{\text{agg}} \approx k \cdot v^n$$

Formel 9

Hvor

Δp_{agg} = Trykkfall i aggregatet

k = Konstant

v = Lufthastighet [m/s]

n = Strømningseksponent, hvor 1 = Laminær og 2 = Turbulent.

For å bestemme strømningseksponenten (n), er forholdet mellom trykkfall over komponentene i ventilasjonsaggregatet (y-aksen) og luftmengder (x-aksen) betraktet for de ulike driftsstillingene. Trykkfallene over hver av komponentene er sammenlignet med simuleringer utført i aggregatprodusentenes dimensjoneringsprogrammer (Swegons ProUnit og SystemairCAD). ProUnit benytter forhold mellom trykkfall og luftmengder fra tester utført i laboratorium. SystemairCAD får

sine forhold mellom trykkfall og luftmengder dels fra tester i laboratorium og dels gjennom DDL-filer fra komponentenes produsenter [44], [45]. Det trykkfallet, av differensialtrykk- og absoluttrykkmåling, som ligger nærmest det simulerte trykkfallet er benyttet til videre beregninger.

Ved å benytte logaritmisk skala på x- og y-aksen, danner punktene en lineær trendlinje. Mellom disse punktene er det plottet en potenskurve, og likningen for den lineære trendlinjen er på følgende form:

$$y = a \cdot x^b \quad \text{Formel 10}$$

Hvor $y = \Delta p_{agg}$, $a = k$, $x = v$ og $b = n$.

Med andre ord er strømningssekspONENTEN lik eksponenten (b) i Formel 10. StrømningssekspONENTEN finnes for hver av komponentene i aggregatet: Filter på tillufts- avtrekkssiden, tilluftsvifte, avtrekksvifte, varmeveksler på avtrekks- og tilluftsside og varmebatteri. På denne måten kan man se hvordan strømningsforholdene er for de ulike komponentene. Ettersom at det er en viss måleusikkerhet, er det beregnet en «lav» og en «høy» strømningssekspONENT for bygg med kun to driftsstillinger. For den lave strømningssekspONENTEN er det valgt høyeste måleverdi av trykkfallet ved laveste driftsstilling og laveste måleverdi av trykkfallet ved høyeste driftsstilling. Det motsatte er gjort for å finne den høye strømningssekspONENTEN. For å beregne strømningssekspONENTEN i aggregatet er det sett på trykkfallet fra før filter til etter varmeveksler, for henholdsvis tillufts- og avtrekkssiden. Også her er det beregnet en «lav» og «høy» strømningssekspONENT for bygg med kun to driftsstillinger. Technical Note 65 [35] angir at en typisk strømningssekspONENT for et ventilasjonsaggregat er omtrent 1,4.

3.6.2 – BEREKNING AV LUFTMENGDER

Det er benyttet ulike formler for beregning av luftmengdene, som er gitt for ulike venturi ved vifteinnløpene:

Aibel-bygget [46]:

$$q = v((\Delta p / C1) + C2) - C3 \quad \text{Formel 11}$$

Hvor

q = Luftmengde [m^3/s]

Δp = Trykkfall over venturi [Pa]

$C1$ = 77,688

$$C2 = 0,00174$$

$$C3 = 0,04$$

Nydalen Videregående Skole [3]:

$$q_v = K \cdot v \cdot ((2/\rho) \cdot \Delta p)$$

Formel 12

Hvor

$$q_v = \text{Luftmengde [m}^3/\text{h]}$$

$$K = 485 [\text{m}^2 \cdot \text{s}/\text{h}]$$

$$\rho = \text{Luftens tetthet [kg/m}^3\text{]}$$

$$\Delta p = \text{Trykkfall over venturi [Pa]}$$

Miljøhuset GK [47]:

$$q_v = v \cdot (\rho_{20}/\rho_{\text{Betr}}) \cdot k_{20} \cdot v \cdot (\Delta p_w)$$

Formel 13

Hvor

$$q_v = \text{Luftmengde [m}^3/\text{h]}$$

$$\rho_{20} = \text{Luftens tetthet ved } 20^\circ\text{C [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_{\text{Betr}} = \text{Luftens tetthet ved aktuell temperatur [kg/m}^3\text{]}$$

$$k_{20} = 620 [\text{m}^2 \cdot \text{s}/\text{h}]$$

$$\Delta p_w = \text{Trykkfall over venturi [Pa]}$$

Forskningsparken:

I Forskningsparken ble luftmengder beregnet som summen av luftmengdene ved samtlige grenspjeld på tilluftssiden etter følgende formel [48]:

$$q = k \cdot v \cdot (\Delta p_i)$$

Formel 14

Hvor

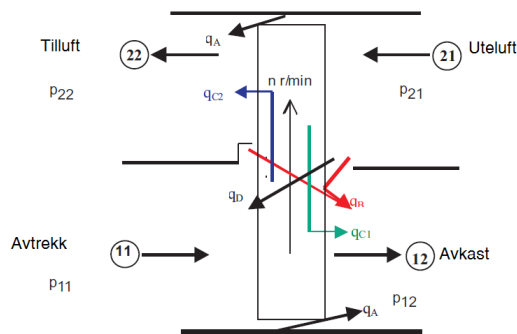
$$q = \text{Luftmengde [m}^3/\text{s]}$$

$$k = 65,5 (\text{Ø}315) \text{ og } 109 (\text{Ø}400)$$

$$\Delta p_i = \text{Trykkfall over måleblende [Pa]}$$

3.6.3 - LUFTMENGDELEKKASJE I RENBLÅSNINGSSEKTOR

For beregning av SFP_E benyttes den største luftmengden av tilluft og avtrekk i ventilasjonsanlegget. Ventilasjonsanlegget har to viftemotorer – én for tilluft og én for avtrekk. Mellom disse er det i aggregatet montert roterende varmeveksler. For at det ikke skal komme forurenset luft over i friskluften som tilføres bygget, er varmeveksleren utstyrt med en renblåsningssektor med et høyere trykk på tilluftssiden. Noe av friskluften vil da strømmen gjennom renblåsningssektoren direkte over til avkastsiden. Luftmengdene i ventilasjonsaggregatet måles ved venturi før viftene. For å finne største luftmengde av tilluft og avtrekk, må man først beregne hva avtrekksluftmengden er. Luftmengden man måler ved venturi er avkastluftmengden. Avtrekksluftmengden beregnes ved å trekke renblåsningsluftmengden fra den målte avkastluftmengden. [6]



Figur 17 Prinsippskisse av roterende varmeveksler i ventilasjonsaggregat. Modifisert skjermdump fra [6]

q_A = Luftlekkasje rundt varmeveksler mellom uteluft og tilluft [m^3/s]

q_B = Luftlekkasje gjennom pakninger osv. [m^3/s]

q_{C1} = Luftlekkasje i varmeveksler mellom uteluft og avkast og forurenset luft. (På andre siden av renblåsningssektoren) [m^3/s]

q_{C2} = Luftlekkasje (carry over) mellom avtrekk til tilluft. [m^3/s]

q_D = Luftstrømning i renblåsningssektoren (purge sector) [m^3/s]

For å beregne denne luftlekkasjen kan formel beskrevet i Eurovent 6/8 [6] benyttes. Formelen gir den totale lekkasjestrømmen, $q_{v,lekkasje} = q_B + q_{C1} - q_{C2} + q_D$, til avkastsiden (se Figur 17).

$$q_B = D * (k_1 + k_2 * (p_{21} - p_{11}) * 10^{-3}) \quad \text{Formel 15}$$

Hvor

D = Rotordiameter [m]

k_1, k_2 = Konstantene er avhengige av kvaliteten av pakninger og innstilling av rotor.

$k_1 = 0,02 - 0,04$ og $k_2 = 0,08 - 0,15$

$$q_{v,lekkasje} = q_B + \frac{\theta}{180} * \left(\frac{p_{21} - p_{11}}{p_{21} - p_{22}} \right)^{\frac{1}{f}} * q_{22} \quad \text{Formel 16}$$

Hvor

$q_{v,lekkasje}$ = Total luftlekkasje [m^3/s]

θ = Vinkel til renblåsningssektor [$^\circ$]

p_{11}, p_{21}, p_{22} = Lufttrykk i punktene illustrert i Figur 17 [m^3/s]

f = Effektfaktor som beskriver koblingen mellom trykkfall og hastighet. Normal struktur ligger nær 1.

q_{22} = Luftmengde – tilluft [m^3/s]

3.6.4 – BEREGNING AV SFP, BASERT PÅ MÅLTE VERDIER

Den spesifikke vifteeffekten (SFP) er beregnet etter følgende formel [35]:

$$\text{SFP} = \frac{\Sigma P}{q_v} \quad [\text{kw}/(\text{m}^3/\text{s})] \quad \text{Formel 17}$$

Hvor

ΣP = Sum av effekt alle viftene [kW]

q_v = Største luftmengde av tilluft og avtrekk [m^3/s]

Ved Aibel-bygget er summen av effekt til viftene beregnet som:

$$\Sigma P = P_{\text{Inntak}} - P_{\text{Styrestrøm}} \quad \text{Formel 18}$$

Hvor

P_{Inntak} = Effekten for hele aggregatet [kW]

$P_{\text{Styrestrøm}}$ = Effekten til styring av aggregatet [kW]

3.6.5 – BEREGNING AV REGULERINGSTRYKK

På bygg hvor det er kanalstrekk mellom siste VAV-enhet og ventil, er trykkfallet beregnet som følger [37]:

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_s + \Delta p_d = \Delta p_s + (\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2) \quad \text{Formel 19}$$

Hvor

Δp_{tot} = Totalt trykkfall [Pa]

Δp_s = Statisk trykkfall [Pa]

Δp_d = Dynamisk trykkfall [Pa]

ρ = Luftens tetthet [kg/m³]

v = Luftens hastighet [m/s]

For bygg med VAV-enhet plassert i ventil, antas det dynamiske trykkfallet å være tilnærmet null.

Dermed blir reguleringstrykket beregnet slik:

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_s \quad \text{Formel 20}$$

3.6.6 – BEREGNING AV EKSTERNT TRYKKFALL OG VIFTENES TRYKKOPPBYGNING

Eksternt trykkfall på tilluftssiden er beregnet som:

$$\Delta p_{\text{ekst, tilluft}} = p_{s,\text{tilluft}} - p_{s,\text{inntak}} \quad \text{[Pa]} \quad \text{Formel 21}$$

Hvor

$p_{s,\text{tilluft}}$ = Statisk trykk på tilluftssiden av aggregatet [Pa]

$p_{s,\text{inntak}}$ = Statisk trykk på inntakssiden av aggregatet [Pa]

Tilsvarende beregnes eksternt trykkfall på avtrekkssiden:

$$\Delta p_{\text{ekst, avtrekk}} = p_{s,\text{avkast}} - p_{s,\text{avtrekk}} \quad \text{[Pa]} \quad \text{Formel 22}$$

Hvor

$p_{s,\text{avkast}}$ = Statisk trykk på tilluftssiden av aggregatet [Pa]

$p_{s,\text{avtrekk}}$ = Statisk trykk på inntakssiden av aggregatet [Pa]

Viftenes trykkoppbygningen i ventilasjonssystemet beregnes som summen av målt trykkoppbygning over tillufts- og avtrekksviften.

3.6.7 – BEREGNING AV MÅLT TOTAL SYSTEMVIRKNINGSGRAD

Den totale systemvirkningsgraden for tillufts- og avtrekksvifter er beregnet som følger [35]:

$$\eta_{tot} = \frac{\Delta p_{tot} * q_v}{P_{in}} \quad \text{Formel 23}$$

Hvor

η_{tot} = Total systemvirkningsgrad	[-]
Δp_{tot} = Trykkoppbygning	[Pa]
q_v = Luftmengde	[m ³ /s]
P_{in} = Effekt inn	[W]

Det er mest riktig å benytte totaltrykket når en beregner total systemvirkningsgrad, men den spesifikke vifteeffekten (SFP) vil være den samme om man benytter statisk eller total trykkoppbygning [35]. For denne beregningen er statisk trykkoppbygning benyttet.

3.6.8 – BEREGNING AV DIMENSJONERENDE EKSTERNTRYKK OG REGULERINGSTRYKK I HENHOLD TIL NS3031, TILLEGG H

For å finne hvilke verdier for reguleringstrykk og dimensjonerende eksterntrykk som er best egnet i beregning av SFP i henhold til utkast av NS 3031 Tillegg H, er analyseverktøyet «Problemløser» i Excel benyttet. Det er beregnet et avvik mellom målt og beregnet trykkoppbygning over viftene. Målet i problemløseren settes til å minimere dette avviket ved å endre inndataene dimensjonerende eksterntrykk og prosentandelen av dimensjonerende eksterntrykk som reguleringstrykket utgjør. For byggene med flere driftstillinger summeres avviket for driftstillingene, og målet blir da å minimere denne summen. Reguleringstrykket er beregnet ved å gange prosentandelen som utgjør reguleringstrykket med det beregnede dimensjonerende eksterntrykket. Videre er trykkfallet i kanalsystemet beregnet (se Formel 29) for å kunne sammenligne med målte trykkfall.

3.6.9 – BEREGNING AV TEORETISK TRYKKOPPBYGNING, SYSTEMVIRKNINGSGRAD OG SFP

Beregning av teoretisk trykkoppbygning og systemvirkningsgrad for viftene er beregnet etter henholdsvis Formel 26 og Formel 28, presentert i kapittel 4.1.8 – Beregning av SFP og eksterntrykk for ulike driftspunkt. I utregning av SFP ved ulike driftspunkt er Formel 25 benyttet, hvor dimensjonerende trykkfall og reguleringstrykk er hentet fra beregning beskrevet i kapittel 3.6.8 – Beregning av dimensjonerende eksterntrykk og reguleringstrykk i henhold til NS3031, Tillegg H.

4 - RESULTATER

4.1 – KARTLEGGING AV AKTUELLE PARAMETERE FOR ENKEL BEREGNINGSMODELL

For enkelt å kunne gjøre energieffektive valg i utarbeidelse av et ventilasjonsanlegg, er det nødvendig å begrense antall parametere som inngår og da også antall nødvendige inndata som kreves av brukeren/ingeniøren. Samtidig er det viktig å finne frem til de parameterne som vil resultere i realistiske simuleringsresultater. Disse vil igjen kunne danne grunnlaget for sammenligninger mellom ulike alternativ for å oppnå et mest mulig optimalt ventilasjonsanlegg for det enkelte prosjekt. I dette kapitlet er fokuset rettet mot å bestemme hvilke parametere som er sentrale i en enkel beregningsmodell for å gjøre riktige valg, og hvilke parametere som har størst påvirkning i forhold til ulike løsninger.

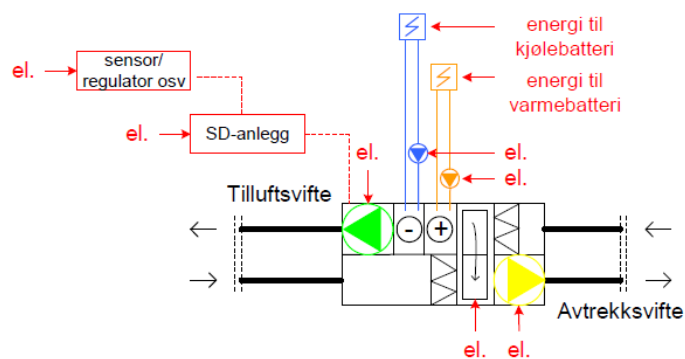
4.1.1 - LIVSSYKLUSKOSTNADSANALYSE

Livssyklus-kostnadsanalyser kan benyttes til en rekke formål, deriblant sammenligning mellom ulike tekniske løsninger. Det er viktig at det ikke kun tas hensyn til investeringskostnaden ved anskaffelse av for eksempel et ventilasjonsanlegg, men også til fremtidige drifts- og vedlikeholdskostnader. NS 3454 [49] presenterer beregningsmodeller som gjør det enkelt å få fram et økonomisk helhetsbilde, ved sammenligning av ulike valg i prosjekteringsarbeidet. I en økonomisk beregning er det viktig å ta hensyn til hele ventilasjonsanleggets livssyklus, der fremtidige kostnader og inntekter tillegges mindre verdi utover i anleggets levetid. Jo høyere kalkulasjonsrente som benyttes i beregningene, desto mindre nåverdi vil fremtidige kostnader eller inntekter ha [50]. For å redusere nødvendige inndata i en LCC-analyse, må antall poster som inngår også reduseres. Dette kan løses ved at kostnadsposter som ikke vil påvirke sammenligningen utelukkes [51].

4.1.2 – HVOR LIGGER ENERGIBEHOVET I ET VENTILASJONSANLEGG?

Prosjektrapport 73 «LECO – Behovstilpasset ventilasjon» [11] oppgir følgende funksjoner, i et balansert ventilasjonsanlegg, som krever energi:

- o Klimatisering av ventilasjonsluft: Her inngår oppvarming og eventuelt kjøling, med sirkulasjonspumper til varme- og kjølebatterier.
- o Drift av ventilasjonsvifter: energi til viftemotor.
- o Drift av luftbehandlingsanlegget: Med dette menes drift av varmegjenvinner og drift av automatisering.



Figur 18 Komponenter i et ventilasjonsanlegg med energibehov [11]

Figur 18 viser de ulike komponentene som krever energi i et ventilasjonsanlegg.

For oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft vil settpunktet for tilluftstemperaturen på henholdsvis vinter og sommer, samt driftstid og luftmengde påvirke energibehovet. Videre vil temperaturvirkningsgraden til varmegjenvinneren påvirke oppvarmingsbehovet, ettersom at høyere temperaturvirkningsgrad gir mer gjenvunnet varme fra avtrekksiden, og dermed lavere oppvarmingsbehov. Pumpene som leverer væske til batterier i ventilasjonsaggregatet krever energi, og dette energibehovet avhenger av motortype, reguleringsmetode, driftstid og vannmengde (eventuelt uttrykt som luftmengde). Energien til drift av pumpene vil reduseres ved når luftmengdene reduseres. Viftenes energibehov til transport av luft påvirkes av hva slags viftemotor og viftetype som benyttes. Trykkfall i kanalnettet i ventilasjonsanlegget og i aggregatet, samt reguleringsmetode, driftstid og luftmengde er også med på å bestemme hva energibehovet for viftene blir. Energibehovet til drift av varmegjenvinneren vil variere med driftstid, luftmengde og motortype, men driften av rotor ansees å være ganske stabil for ulike reguleringsprinsipper. [11]

I et system med variable luftmengder (VAV), uavhengig av reguleringsprinsipp, kreves det mange elektriske komponenter i anlegget. Og når det gjelder drift av automatisering, vil energibehovet kunne variere med hvorvidt anlegget er i døgkontinuerlig drift eller ikke. SAAS Prosjekt AS har opplyst at én styrings- og kommunikasjonsenheten (CVaV) bruker 3W og er i drift hele døgnet. Automatikken vil utgjøre lite i forhold til det totale energibehovet for ventilasjonsanlegget. Når energibehovet til klimatisering av luft og viftedrift reduseres, vil automatikken utgjøre en større del av det totale energibehovet [11].

For å oppnå optimal energiutnyttelse ved ventilasjonsanlegg, bør energien benyttes slik at ønsket klima og luftkvalitet oppnås, samt at det tas økonomiske hensyn. For å redusere energibehovet som kreves i et ventilasjonsanlegg, er det viktig blant annet å ha god gjenvinning av varme fra avtrekksluften, behovsstyring av luftmengden og velge vifte og motor med god virkningsgrad [50].

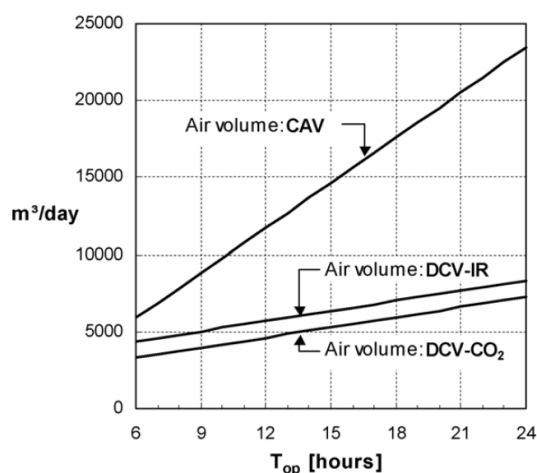
4.1.3 - SAMTIDIGHET OG TILSTEDEVÆRELSE

For prosjektering av et ventilasjonsanlegg er det viktig å bestemme antatt maksimal og antatt gjennomsnittlig samtidighet. Når anlegget dimensjoneres skal den antatt maksimale samtidigheten benyttes, og den antatt gjennomsnittlige samtidigheten brukes for å utføre energiberegninger [11].

Ved å benytte en tilstedeværelsesfaktor, vil en kunne redusere luftmengdene. Dette vil føre til at det i korte perioder, når tilstedeværelsesfaktoren overstiger dimensjonerende faktor, vil man få en luftmengde lavere enn hva behovet tilsier. Dette behøver nødvendigvis ikke å gå vesentlig ut over luftkvaliteten, da norske kontorbygg har store ventilasjonsluftmengder. Tilstedeværelsen i et kontorbygg vil være avhengig av gulvarealets utforming, hva slags type bedrift som benytter lokalene og hvordan de arbeider, og kombinasjonen av dette er en viktig forutsetning ved dimensjonering av ventilasjonssystemer [52]. Videre vil tilstedeværelsen variere i ulike deler av året. Faktorene som er med på å tilsa hva tilstedeværelsen er viktig å vurdere i prosjekteringsfasen [11]. Prosjektrapport 42 [53] gir i Vedlegg B et eksempel på beregning av gjennomsnittlige luftmengder med ulik predefinert tilstedeværelse og samtidighet for ulike bygningskategorier.

4.1.4 - VALG AV SENSORER

Det vil være forskjell i reduksjon av luftmengder ut i fra hva slags type sensor som benyttes. Et forsøk utført ved flere skoler i Oslo viser at hvorvidt bevegelses- eller CO₂-sensor er å foretrekke er avhengig av fravær av elever og utnyttelse av klasserommets kapasitet. Hvis klasserommene er fulle og fraværet er neglisjerbart vil bevegelsessensor være å foretrekke. For det motsatte tilfelle vil CO₂-sensor gi best resultat [4]. Figur 19 er hentet fra det samme forskningsprosjektet, og viser hvordan driftstiden påvirker luftmengdene ved ulike kontrollstrategier. Dette er basert på beregninger hvor det er tatt utgangspunkt i et gjennomsnittlig klasserom med 22 personer til stede. Behovsstyring med CO₂-sensor (DCV-CO₂) gir her noe lavere luftmengder enn ved bruk av bevegelsesføler (DCV-IR). Begge alternativene gir vesentlig reduksjon i forhold til bruk av konstante luftmengder (CAV).



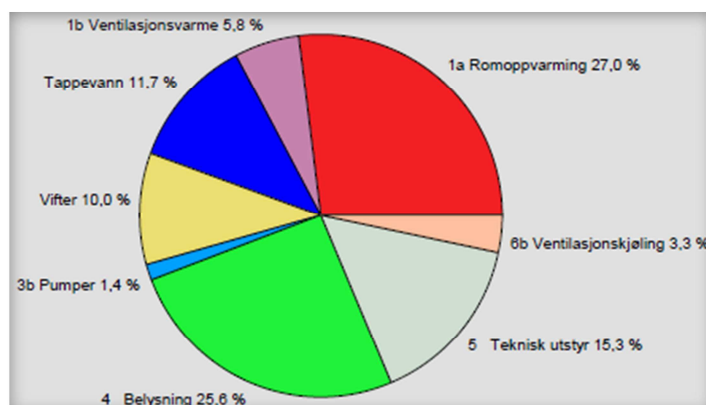
Figur 19 Viser sammenheng mellom luftmengder per dag og ulike lengder for driftstid i timer [4]

Det er utført flere forsøk med nye strategier for ytterligere å øke energibesparelsen ved bruk av CO₂- og IR-sensorer. En strategi for CO₂-sensorer går ut på å utføre dynamisk beregning av ventilasjonsluften for hver av periodene det er tilstedeværelse. Energibesparelsen for ventilasjonsluft viste seg å være 34 % for et treningssenter og 26 % for vanlige bygninger sammenlignet med proporsjonal styring [54]. Tilsvarende forskning er gjort på IR-sensorer, hvor strategien går ut på å redusere tidsforsinkelsen ved at tilstedeværelsessensoren lærer hvordan aktivitetsnivået varierer med tiden i løpet av dagen. Eksperimenter viste at metoden kunne gi omtrent 5 % energibesparelse i forhold til IR-sensorer med fastsatt tidsforsinkelse [55].

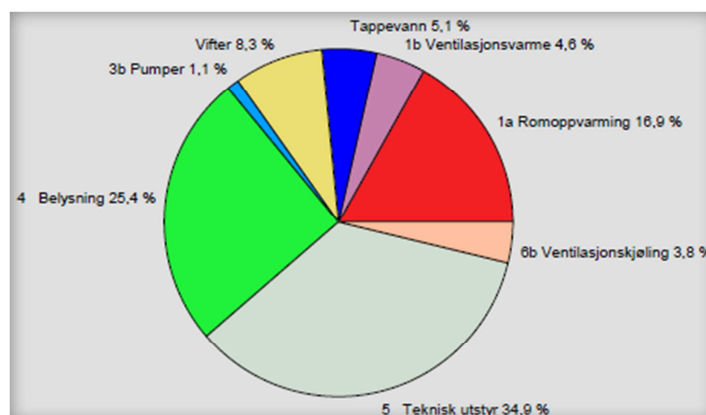
4.1.5 – KLIMATISERING OG VARMEGJENVINNING

For å gjøre et estimat av størrelsesorden på oppvarmings- og kjølebehovet for klimatisering av tilluft i forhold til hva som kreves til viftedrift, er beregningsprogrammet SIMIEN (versjon 5.007) tatt i bruk. SIMIEN utfører energiberegninger i henhold til formelverk i NS 3031 [56]. Det er utført to simuleringer, en for et referanse-skolebygg og en for et referanse-kontorbygg. SIMIEN-filene som det er tatt utgangspunkt i er de samme som er benyttet for å sette rammebetingelser i TEK07. Det som er endret på er spesifikke vifteeffekten og luftmengdene, som er beregnet i henhold til Prosjektrapport 42 [53].

Årssimuleringen for referanse-skolebygget viste at energibehovet til vifter utgjorde 10,0 % av det totale årlige energibudsjettet. Energibehovet til batterier for ventilasjonsvarme og – kjøling utgjorde henholdsvis 5,8 % og 3,3 %. I denne simuleringen er den spesifikke vifteeffekten satt til 1,5 kW/(m³/s) og temperaturvirkningsgraden på gjenvinneren er satt til 85 %. Settes



Figur 20 Fordeling av årlig energibudsjett, SIMIEN-simulering skolebygg med temperaturvirkningsgrad lik 85 %



Figur 21 Fordeling av årlig energibudsjett, SIMIEN-simulering kontorbygg med temperaturvirkningsgrad lik 85 %

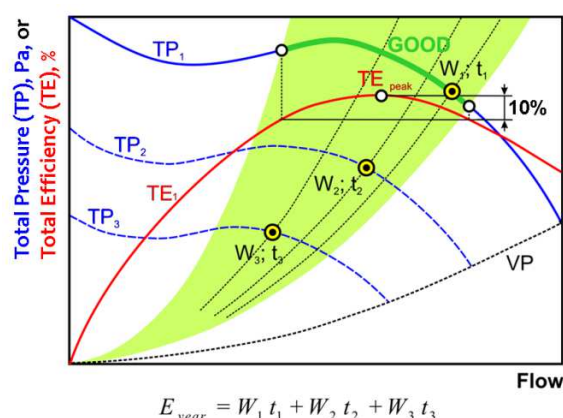
temperaturvirkningsgraden ned til 70 %, øker energibehovet til ventilasjonsvarme til 19,0 %, ventilasjonskjøling synker til 2,8 % og vifter utgjør da 8,6 %.

Tilsvarende simulering ble utført for referanse-kontorbygget, som med $SFP = 1,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ og temperaturvirkningsgrad lik 85 % utgjorde energibehovet for vifter 8,3 %. Energiforbruket til ventilasjonsvarme og – kjøling utgjorde her henholdsvis 4,6 % og 3,8 %.

temperaturvirkningsgraden for varmegjenvinning ble satt ned til 70 %, økte energibehovet til oppvarming av tilluft til en andel på 14,9 %. Energiforbruket for vifter og ventilasjonskjøling ble da redusert til henholdsvis 7,4 % og 3,4 %.

4.1.6 – VALG AV VIFTE

Vifter velges ofte ut fra annet grunnlag enn det tekniske, som for eksempel pris, frakt, tilgjengelighet eller tidligere kjennskap modellen. Valg av vifte skal baseres på beregninger av luftmengde og trykkoppbygning som kreves i anlegget, og viftene skal være av design og materiale som imøtekommer disse kravene. Det er knyttet stor usikkerhet til hva som er den korrekte luftmengden og trykkoppbygningen i et ventilasjonsanlegg. I tillegg beregnes det kanskje ekstra kapasitet for mulige utvidelser på et senere tidspunkt. Denne usikkerheten til luftmengde og ønske om større kapasitet er med på å øke størrelsen på vifte og motor. En overdimensjonert vifte og motor fører blant annet til ineffektiv viftedrift, økt støy og vibrasjoner i kanalnett [57]. Denne typen lavfrekvent støy er vanskelig og dyr å dempe [35]. For å velge optimal viftestørrelse er det viktig å ta hensyn til viftens ytelseskurver. Dette er kurver som viser trykkoppbygning og virkningsgrad i forhold til ulike luftmengder (Se Figur 22). For å finne det driftspunktet som viften er mest kostnads- og energieffektiv, må en lokalisere driftspunktet hvor viften oppnår best virkningsgrad. Hvis viftene drifter nær dette punktet, vil viften ha god ytelse, samt lite slitasje [57]. Viftene bør normalt sett drifte ved og nær beste virkningsgrad. For ventilasjonsanlegg som har variable luftmengder, kan viftestørrelsen optimaliseres ved å ta hensyn til hvor lang tid anlegget drifter med ulike luftmengder. For hver av viftehastighetene bør ideelt sett virkningsgraden ikke være lavere enn 10 % av viftens maksimale virkningsgrad. I de få tidsrommene hvor det kreves maksimal luftmengde, vil støyen fra viften være høyfrekvent. Høyfrekvent støy vil enkelt kunne dempes ved å benytte billigere lyddempere [35]. I tillegg kan det oppstå ustabil drift av viftene i området hvor kurven for det totale



Figur 22 [Fig. © ACME Engineering & Manufacturing Corp]

annet til ineffektiv viftedrift, økt støy og vibrasjoner i kanalnett [57]. Denne typen lavfrekvent støy er vanskelig og dyr å dempe [35]. For å velge optimal viftestørrelse er det viktig å ta hensyn til viftens ytelseskurver. Dette er kurver som viser trykkoppbygning og virkningsgrad i forhold til ulike luftmengder (Se Figur 22). For å finne det driftspunktet som viften er mest kostnads- og energieffektiv, må en lokalisere driftspunktet hvor viften oppnår best virkningsgrad. Hvis viftene drifter nær dette punktet, vil viften ha god ytelse, samt lite slitasje [57]. Viftene bør normalt sett drifte ved og nær beste virkningsgrad. For ventilasjonsanlegg som har variable luftmengder, kan viftestørrelsen optimaliseres ved å ta hensyn til hvor lang tid anlegget drifter med ulike luftmengder. For hver av viftehastighetene bør ideelt sett virkningsgraden ikke være lavere enn 10 % av viftens maksimale virkningsgrad. I de få tidsrommene hvor det kreves maksimal luftmengde, vil støyen fra viften være høyfrekvent. Høyfrekvent støy vil enkelt kunne dempes ved å benytte billigere lyddempere [35]. I tillegg kan det oppstå ustabil drift av viftene i området hvor kurven for det totale

trykkfallet (blå kurver merket TP i Figur 22) får en dupp til venstre for det grønne, skraverte området. Viften prøver å øke luftmengden og systemtrykket øker, noe som igjen fører til redusert luftmengde. Når luftmengden minker, faller også systemtrykket og viften responderer med å øke luftmengden. Det er denne syklusen som fører til ustabilitet [57]. Motorens virkningsgrad vil variere med hva slags type motor som velges. Vanlige større motorer er asynkronmotorer (AC), der 4-polet tre-fasemotor oppnår best virkningsgrad. EC-motorer (elektronisk omformer) blir mer og mer populære. Selv om de er dyrere enn AC-motorer og frekvensomformer til sammen, har EC-motoren lavere livssykluskostnader på grunn av høyere virkningsgrad (spesielt under drift med dellast). Virkningsgraden i forhold til motorstørrelsen avhenger av motortype og produsent, og bør dermed kontrolleres for hvert tilfelle [35].

Standardene ISO 12759 [58] og AMCA Standard 205-12 [59] definerer et system for å klassifisere viftesystemer. I USA selges ofte vifter og motorer separat, og dermed benytter AMCA 205 en klassifisering kalt «Fan Efficiency Grade» (FEG), som kun gjelder for vifter. I Europa leveres ofte motor og vifte samlet og ISO 12759 oppgir i tillegg klassifiseringen «Fan/Motor Energy Efficiency» (FMEG). Som navnet tilsier er FMEG klassifisering av virkningsgrad for kombinasjonen vifte og motor [60]. FMEG gjelder for vifter med diameter større enn 125 mm. FMEG-kurvene, som viser forholdet mellom viftenes effektstørrelser og tilhørende største totale virkningsgrad, bestemmes av følgende formel:

$$\eta_{\text{tot,peak}} = a \cdot \ln(P) + b + \text{FMEG} \quad [\%] \quad \text{Formel 24}$$

Hvor $\eta_{\text{tot,peak}}$ er viftesystemets virkningsgrad ved driftspunktet der virkningsgraden er størst. a og b er konstanter som er avhengig av viftetype og motorstørrelse. P er viftesystemets effekt-input [kW] og FMEG er en gradering fra 0 til 100 % som øker i intervaller på 5 % [35].

4.1.7 – SYSTEMEFFEKT

For å kunne oppnå ytelsen for viften som produsenten har brukt for å velge viften, kreves det at luftstrømningen ved innløpet må være fullt utviklet, symmetrisk og fri for virvling. Kanalen i vifteutløpet må være laget slik at strømningen rekker å bli fullt utviklet etter viften. Hvis disse kravene ikke møtes, får man en effekt på vifteytelsen som blir kalt systemeffekt. Når det ikke lar seg gjøre å ha de nødvendige strekkene før og etter viften, gir publikasjonen AMCA Publication 201 måter å beregne systemeffekten. Et eksempel fra denne publikasjonen viser at effektbehovet for å overkomme systemeffekten beregnes til 25 % av det opprinnelige effektbehovet. I dette eksempelet

er det sett på to ulike løsninger, ett med og ett uten nødvendig strekk til plenumskammer etter viften, hvor den samme viften er benyttet og kun hastigheten økes for å overkomme det ekstra trykkfallet. [61]

Store vifter testes ofte i laboratorium i henhold til ISO 5801 eller ANSI/ASHRAE 51.07 (ANSI/AMCA 210-07). Denne testen kan gjøres gjennom fire ulike testkonfigurasjoner. Når et ventilasjonsanlegg skal designes, er det sterkt anbefalt å finne ut om dokumentasjonen for viften er fra en testkonfigurasjon som passer med slik viften vil bli benyttet i anlegget. Hvis den ikke er det, bør det korrigeres med AMCAs systemeffektfaktor [35]. Ved denne måten å beregne systemeffekten på, betraktes forholdet mellom arealet i åpning ut fra viften og arealet i utløpet etter viften. Ut fra dette forholdet kan en ut fra tabell presentert i AMCA Publication 201-02 [62] finne en bokstavkode ut fra forholdet beskrevet over, og hvor lang den effektive kanallengden er etter viften. Denne bokstavkoden finner en så igjen i en kurve, hvor en ut ifra lufthastigheten kan finne trykket som systemeffektfaktoren utgjør.

4.1.8 – BEREGNING AV SFP OG EKSTERNTRYKK FOR ULIKE DRIFTSPUNKT

For å beregne energien som kreves til transport av luft ut i ventilasjonsanlegget, kan spesifikk vifte effekt (SFP) beregnes. En revisjon av Tillegg H i NS 3031 [5] er under utarbeidelse, og der presenteres følgende formel for beregning av $SFP_{e,i}$, som er SFP ved ulike driftsstillinger:

$$SFP_{e,i} = \frac{\Delta p_{f,i}/1000}{\eta_{f,i}} \quad [\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})] \quad \text{Formel 25}$$

$$\Delta p_{f,i} \approx 2 * [\Delta p_{\text{reg}} + \Delta p_{\text{ext,dim}} * S_i^n + (\Delta p_{\text{ext,dim}} - \Delta p_{\text{reg}}) * S_i^2] \quad \text{Formel 26}$$

Hvor

- n = Ventilasjonsaggregatets strømningssekspONENT
- $\Delta p_{f,i}$ = Summen av trykk over begge viftene i ventilasjonsaggregatet, ved driftspunkt i. [Pa]
- Δp_{reg} = Laveste trykkfall over kanalsystemet (tilluft eller avtrekk), som resultat av VAV-regulering. [Pa]
- $\Delta p_{\text{ext,dim}}$ = Trykkfall over kanalsystemet (tilluft eller avtrekk) ved dimensjonerende luftmengde ($\dot{V}_{\text{dim}}$). [Pa]

$$S_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_{\text{dim}}} \quad [-] \quad \text{Formel 27}$$

Hvor

$\dot{V}_i$ = Ventilasjonsaggregatets brutto luftmengde ved gjeldende driftspunkt i . [m^3/h]

$\dot{V}_{\text{dim}}$ = Dimensjonerende luftmengde (luftmengde ved maksimal belastning). [m^3/h]

$$\eta_{f,i} \approx \eta_{f,\text{dim}} * \frac{1 - \text{EXP}(-k * S_i)}{1 - \text{EXP}(-k)} \quad \text{Formel 28}$$

$$= \frac{\Delta p_{\text{ext},\text{dim}}}{250 * \text{SFP}_{\text{dim}}} * \frac{1 - \text{EXP}(-k * S_i)}{1 - \text{EXP}(-k)} [-]$$

Hvor

k = En konstant som beskriver forholdet mellom virkningsgrad og luftmengde.

SFP_{dim} = SFP ved dimensjonerende luftmengde, $\dot{V}_{\text{dim}}$. [$\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$]

I utkastet for revidert versjon av Tillegg H, er det også presentert en formel for bestemmelse av eksternt trykkfall (kanaltrykkfall), som kan benyttes dersom det ikke er utført beregninger av kanaltrykkfall med annen programvare. Denne formelen er som følger [5]:

$$\Delta p_{\text{ext},S} = \Delta p_{\text{reg}} + (\Delta p_{\text{ext},\text{dim}} - \Delta p_{\text{reg}}) * S^2 \quad [\text{Pa}] \quad \text{Formel 29}$$

$$S = \frac{\dot{V}_{\text{red}}}{\dot{V}_{\text{dim}}} \quad [-]$$

Formel 30

Hvor

S = Faktor for reduksjonen i luftmengde relativt til dimensjonerende luftmengde.

$\dot{V}_{\text{red}}$ = Redusert luftmengde (lavere enn dimensjonerende luftmengde). [m^3/h]

4.1.9 – BEREGNING AV TIDSMIDLET SFP

For ventilasjonsanlegg som har ulike driftsstillinger gjennom driftstiden, kan årsgjennomsnittlig SFP beregnes slik for N ulike driftspunkter med varighet Δt_i i timer [35]:

$$\overline{\text{SFPe}} = \frac{\sum_{i=0}^N (\text{SFP}_{e,i} * q_{v,i} * \Delta t_i)}{\sum_{i=0}^N (q_{v,i} * \Delta t_i)} \quad [\text{kW}/(\text{m}^3/\text{h})] \quad \text{Formel 31}$$

4.2 – YTELSE VED EKSISTERENDE ANLEGG OG AKTUELLE INNDATAVERDIER

I dette kapittelet presenteres resultater fra målte og registrerte data ved de fire byggene. Resultater fra beregninger er utført som beskrevet i kapittel 3.6 - Analyse. I tillegg presenteres enkelte resultater basert på simuleringer utført i SIMIEN, ProUnit og SystemairCAD.

4.2.1 – DRIFTSSTILLINGER

I rapporten refereres det til nummererte driftsstillinger for de ulike byggene. Hver av disse driftsstillingene har følgende samtidigheter:

Bygg	Driftsstilling	Samtidighet		
		Største luftmengde (for SFP)	Tilluftsmengde	Avkastluftmengde
Aibel-bygget	1	73,7 %	65,2 %	78,5 %
Aibel-bygget	2	99,2 %	81,5 %	104,4 %
Miljøhuset GK	1	59,5 %	59,5 %	46,9 %
Miljøhuset GK	2	86,3 %	86,3 %	72,7 %
Miljøhuset GK	3	114,1 %	114,1 %	94,8 %
Nydalen VGS	1	46,8 %	43,4 %	51,9 %
Forskningsparken	1	67,7 %	67,7 %	-

Tabell 1 Samtidigheter for de ulike driftsstillingene

For SFP-beregningene er samtidigheten i Tabell 1 presentert som prosentandelen av største luftmengde (enten tilluft eller avtrekk) i forhold til dimensjonerende luftmengde. Tilsvarende samtidighet er her vist for tilluftsmengden og avkastluftmengden (luftmengden som passerer over avtrekksviften).

4.2.2 – BEREGNEDE SFP-VERDIER BASERT PÅ MÅLEDATA

4.2.2.1 – LUFTMENGDER

Bygg	Tilluft/Avkast	Driftsstilling	Beregnet hovedluftmengde	Måleusikkerhet
			[m ³ /h]	[± %]
Aibel-bygget	Tilluft	1	4240,06	11,36
Aibel-bygget	Avkast	1	5100,76	11,39
Aibel-bygget	Tilluft	2	5297,53	11,36
Aibel-bygget	Avkast	2	6783,21	11,37
Nydalen VGS	Tilluft (foran)	1	6067,06	11,36
Nydalen VGS	Avkast (foran)	1	7261,60	11,92
Nydalen VGS	Tilluft (bak)	1	6266,44	11,39
Nydalen VGS	Avkast (bak)	1	7492,00	12,22
Forskningsparken	Tilluft	1	33841,19	27,07
Forskningsparken	Avkast	1	-	-
Miljøhuset GK	Tilluft	1	11893,68	11,36
Miljøhuset GK	Avkast	1	9372,25	12,44
Miljøhuset GK	Tilluft	2	17264,73	11,36
Miljøhuset GK	Avkast	2	14530,25	11,63
Miljøhuset GK	Tilluft	3	22818,02	11,36
Miljøhuset GK	Avkast	3	18969,91	11,57

Tabell 2 Luftmengder og måleusikkerhet

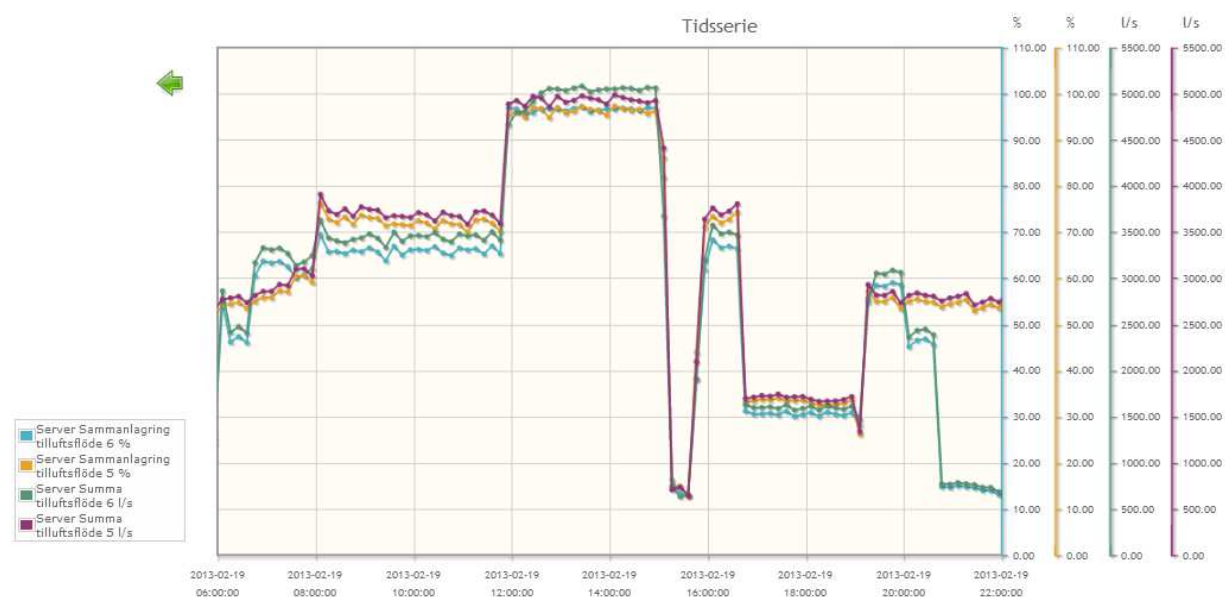
Tabell 2 viser luftmengder beregnet etter metoder beskrevet i kapittel 3.6.2 – Beregning av luftmengder. Luftmengdene er presentert for de ulike byggene og driftsstillingene for henholdsvis tilluft og avkast. For Nydalen Videregående skole er det beregnet luftmengder for begge tillufts- og avtrekksviftene, hvor viftene nærmest aggregatlukene er merket «foran» og viftene inn mot veggen i teknisk rom er merket «bak».

4.2.2.2 – SAMMENLIGNING AV MÅLTE OG REGISTRERTE LUFTMENGDER

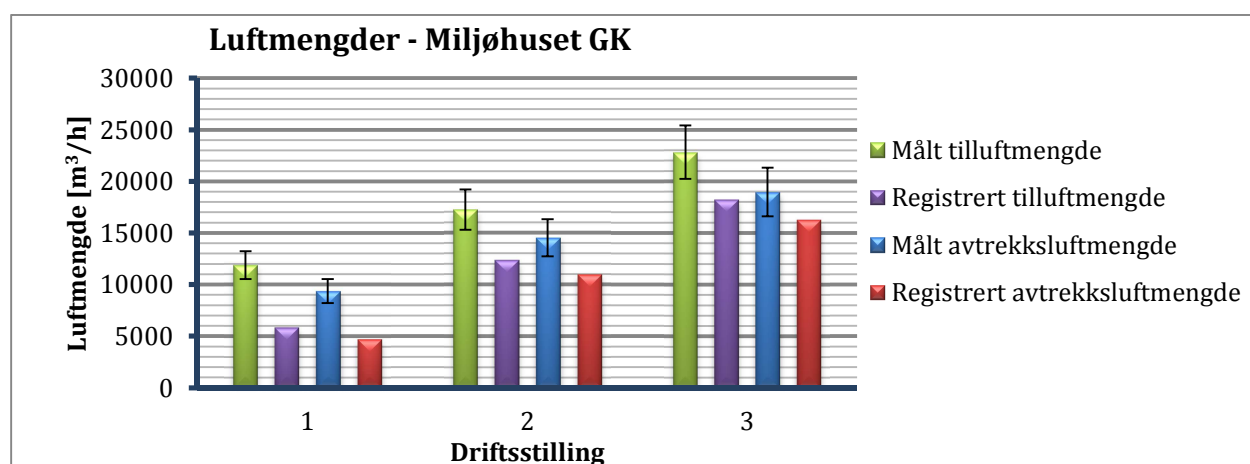
Figur 23 nedenfor viser loggede luftmengder gjennom måledagen på Miljøhuset GK. Den viser kurver for de to ventilasjonsaggregatene som leverer luft til henholdsvis nord og sørsiden av bygg C. Den grønne linjen og lilla linjen viser luftmengden for henholdsvis aggregat 6 og aggregat 5. Tilsvarende viser den blå linjen og den gule linjen prosent av maksimal luftmengde for de to aggregatene.

Målingene ble utført i følgende tidsrom:

- Driftstilling 2: 08:30 – 11:30
- Driftstilling 3: 12:30 – 14:30
- Driftstilling 1: 17:30 – 19:00

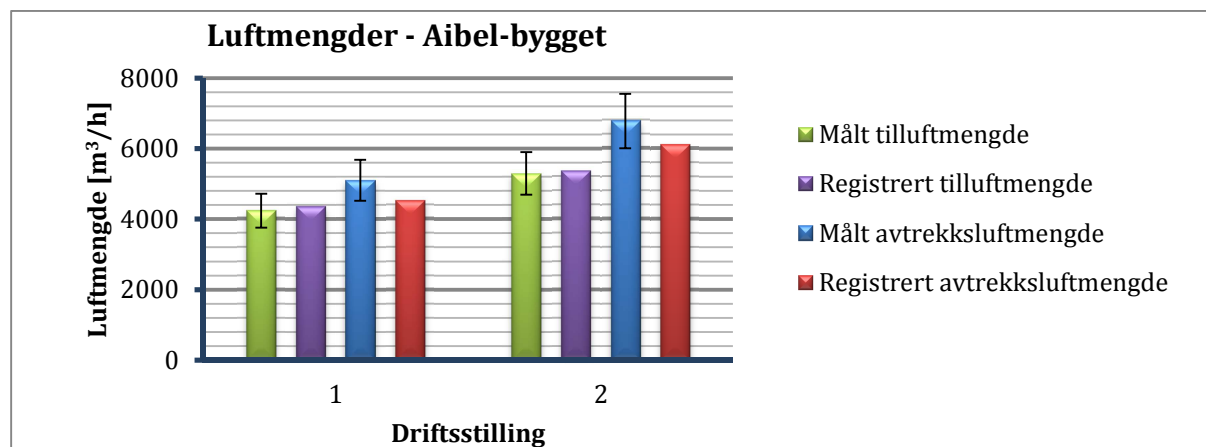


Figur 23 Loggede luftmengder fra Lindinspect ved måledag [63]



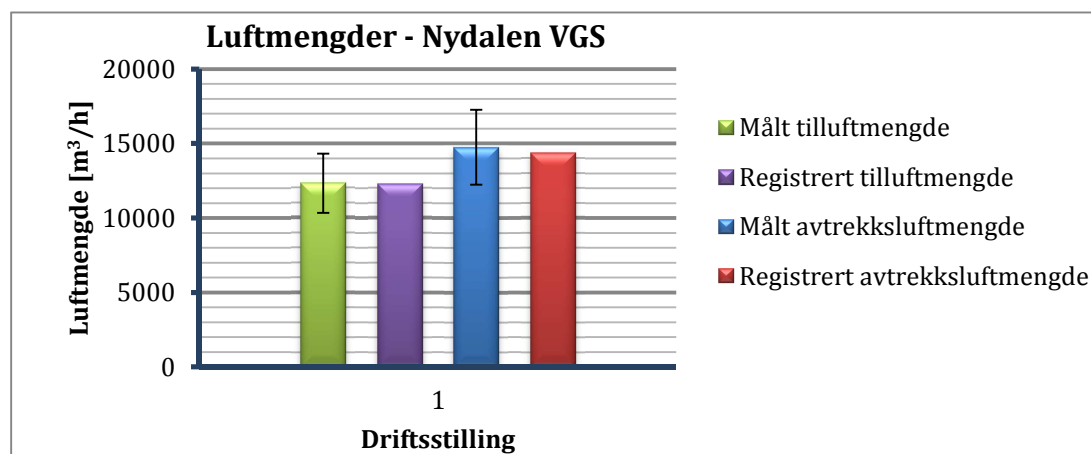
Figur 24 Målte og registrerte luftmengder – Miljøhuset GK

Figur 24 viser forskjellen mellom målte og registrerte til- og avtrekksluftmengder for de ulike driftsstillingene ved Miljøhuset GK. Registrerte luftmengder ble hentet fra Lindinvents web-baserte oversiktsprogram Lindinspect.



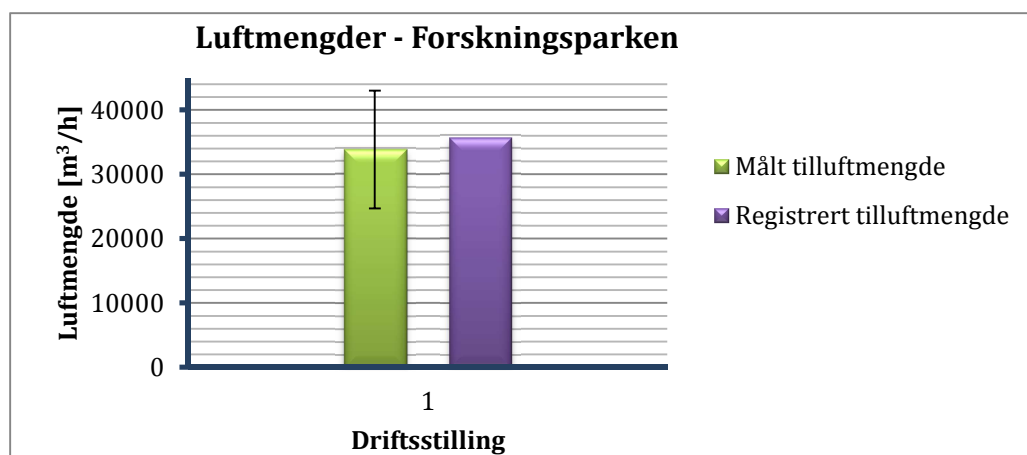
Figur 25 Målte og registrerte luftmengder - Aibel-bygget

Figur 25 viser målte og registrerte luftmengder på tillufts- og avtrekksiden ved Aibel-bygget. De registrerte luftmengdene ble hentet fra håndterminalen som er tilknyttet Gold-aggregatet. De registrerte luftmengdene ved Aibel-bygget måles, i likhet med målingene utført i prosjektet, over venturi før viftene.



Figur 26 Målte og registrerte luftmengder - Nydalen Videregående skole

Figur 26 viser til- og avtrekksluftmengder som er registrert og målt ved Nydalen Videregående skole. Den registrerte luftmengden ble avlest fra skolens SD-anlegg. Også ved Nydalen Videregående skole ble registrerte luftmengder målt over venturi.



Figur 27 Målt og registrert luftmengde - Forskningsparken

Figur 27 viser målt og registrert tilluftsmengde ved Forskningsparken. Både målt og registrert luftmengde er basert på summen av tilluftsmengdene fra samtlige grenspjeld.

4.2.2.3 - RENBLÅSNINGSSEKTOR (%-ANDEL)

Tabell 3 viser de beregnede luftmengdelekkasjene som oppstår ved de ulike byggene og de respektive driftsstillingene. Kolonnen på høyre side viser prosentandelen som lekkasjen gjennom renblåsningssektoren utgjør i forhold til tilluftsmengden. Ved Aibel-bygget er vinkel på renblåsningssektor antatt, og differensialtrykket i driftsstilling 2 er satt lik driftsstilling 1. Beregning av luftlekkasje ved driftsstilling 1 på Miljøhuset GK kunne ikke beregnes, på grunn av at det var målt høyere trykk på avtrekkssiden enn på tilluftssiden (negativt differensialtrykk).

Bygg	Driftsstilling	Diameter	Vinkel	Diff.-trykk	Tilluftsmengde	Lekkasje	% av tilluft
		[m]	[°]	[Pa]	[m³/h]	[m³/h]	[%]
Aibel-bygget	1	1,3	4,40	34,35	4240,06	313,2	7,4
	2	1,3	4,40	34,35	5297,53	337,8	6,4
Miljøhuset GK	1	2,28	5,51	-59,87	22818,02	-	-
	2	2,28	5,51	81,86	17264,73	959,8	5,6
	3	2,28	5,51	72,82	11893,68	783,8	6,6
Nydalen VGS	1	2,05	8,33	120,53	12333,50	1005,3	8,2
Forskningsparken	1	3,2	3,93	21,79	33841,19	1211,6	3,6

Tabell 3 Luftlekkasje i renblåsningssektor

4.2.2.4 – MÅLT EFFEKT

I Tabell 4 er målt effekt ved de ulike byggene presentert. Ved Aibel-bygget ble effekten målt ved inntaket til ventilasjonsanlegg, samt styrestrømmen, og disse er her markert med parentes. For de resterende byggene er effektene som er oppgitt for tillufts- og avtrekksviftene. Andre kolonne fra høyre viser den totale effekten for både tillufts- og avtrekksviftene, og respektive måleavvik i kolonnen til høyre. Årsaken til at det er høyere måleavvik ved Aibel-bygget er på grunn av at det ble benyttet en Fluke 43 for å måle styrestrømmen.

Bygg	Driftsstilling	Effekt tilluft (Inntak)	Effekt avtrekk (Styrestrøm)	Sum effekt	Måleusikkerhet
		[kW]	[kW]	[kW]	[%]
Aibel-bygget	1	(1,81)	(0,12)	1,69	4,77
Aibel-bygget	2	(2,72)	(0,12)	2,6	4,77
Miljøhuset GK	1	1,08	0,86	1,94	2,35
Miljøhuset GK	2	2,51	2,17	4,68	2,35
Miljøhuset GK	3	5,37	4,48	9,85	2,35
Nydalen VGS	1	1,87	2,54	4,41	2,35
Forskningsparken	1	7,5	7,02	14,52	2,35

Tabell 4 Målte effekter

4.2.3 - SFP

Tabell 5 viser beregnede SFP-verdier for de ulike byggene og driftsstillingene. De spesifikke vifteeffektene er beregnet fra de målte luftmengdene og effektene som er presentert i kapitlene ovenfor. For Aibel-bygget og Nydalen VGS er de største luftmengdene avkastluftmengden hvor lekkasjen gjennom renblåsningssektoren er trukket fra (avtrekksluftmengden). For Miljøhuset GK og Forskningsparken er det tilluftsmengden som er størst. Høyre kolonne viser måleusikkerheten.

Bygg	Driftsstilling	Største luftmengde	Sum effekt	SFP	Måleavvik SFP
		[m ³ /h]	[kW]	[kW/(m ³ /s)]	[%]
Aibel-bygget	1	4787,76	1,69	1,3	17,48
Aibel-bygget	2	6445,41	2,6	1,5	17,47
Miljøhuset GK	1	11893,68	1,94	0,6	16,96
Miljøhuset GK	2	17264,73	4,68	1,0	16,96
Miljøhuset GK	3	22818,02	9,85	1,6	16,96
Nydalen VGS	1	13315	4,41	1,2	21,23
Forskningsparken	1	33841,19	14,52	1,5	27,17

Tabell 5 Beregnet SFP fra målte verdier

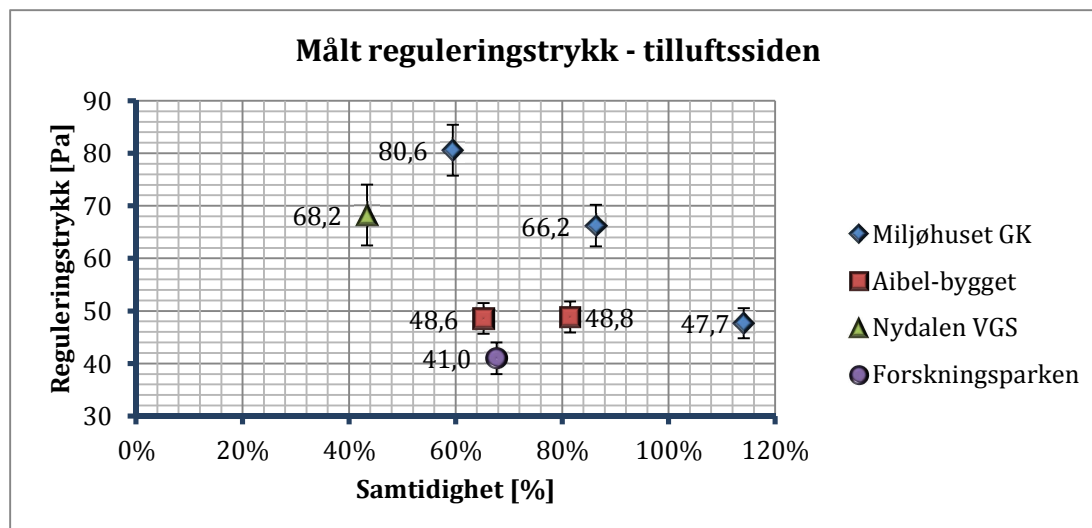
4.2.4 - BEREGNEDE INNDATAVERDIER FOR REVISJON AV NS 3031, TILLEGG H

4.2.4.1 – MÅLT REGULERINGSSTRYKK

I beregning av reguleringstrykk for Nydalen VGS og Forskningsparken, er det medregnet dynamisk trykkfall ettersom at det ved disse byggene er et kanalstrekk etter siste VAV-enhet. I Tabell 6 er det presentert resultater for både statisk og dynamisk trykkfall ved disse to byggene. Fra tabellen kan en se hvordan fordelingen mellom statisk og dynamisk trykkfall er for reguleringstrykkene.

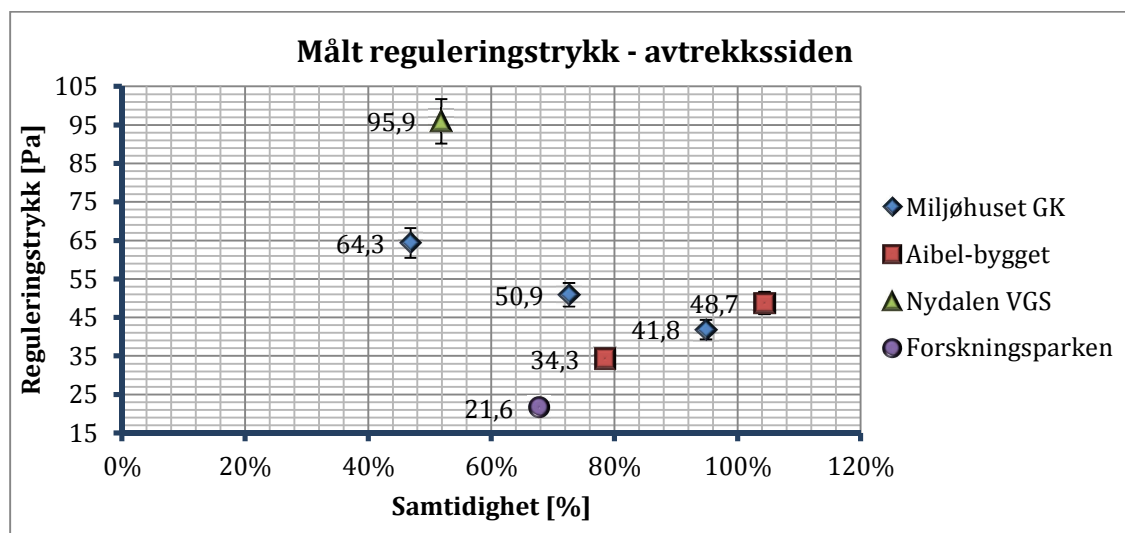
Driftsstilling	Statisk trykkfall	Dynamisk trykkfall
	[Pa]	[Pa]
Nydalen VGS	66,36	1,89
Forskningsparken	34,19	6,81

Tabell 6 Målt statisk og dynamisk trykkfall reguleringstrykk



Figur 28 Målt reguleringstrykk på tilluftssiden

Figur 28 viser de målte reguleringstrykkene ved de fire byggene på tilluftssiden. Reguleringstrykkene er her presentert i forhold til respektive samtidigheter. Dette er altså trykkfallet fra før VAV-spjeld til over tilluftsventilen ved laveste registrerte stikkprøve av reguleringstrykk. Ved Aibel-bygget, som benytter en «Static Pressure Reset»-funksjon (SPR), er reguleringstrykket det statiske trykket der trykkløseren i hovedkanalen er plassert. Reguleringstrykket ved Forskningsparken ble målt like før et 90°-bend etterfulgt av to 45°-bend. Det ble her målt et totaltrykk på 65,2 Pa $\pm$ 9,7 % etter grenspjeldet på grenen.



Figur 29 Målt reguleringstrykk på avtrekkssiden

Figur 29 viser reguleringstrykkene som er målt på avtrekkssiden ved de ulike byggene i forhold til samtidighet.

4.2.4.2 - REGISTRERTE REGULERINGSSTRYKK (MILJØHUSET GK)



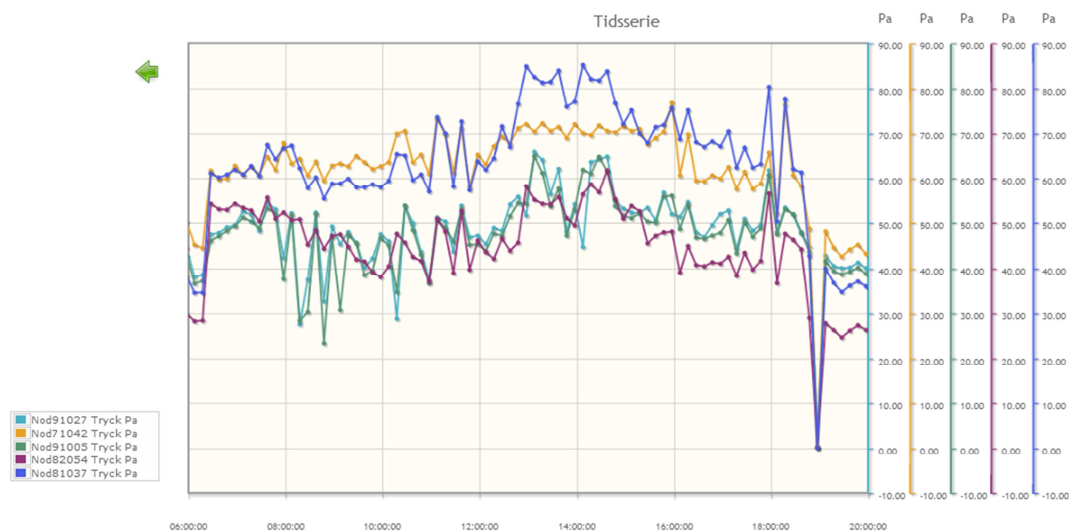
Figur 30 Logget reguleringsstrykk fra måledagen. Skjerm dump fra Lindinspect [63].

Figur 30 er hentet ut fra Lindinspect, og viser reguleringsstrykkene gjennom dagen målingene ble utført. Denne viser at reguleringsstrykkene ikke holder seg helt konstant gjennom de tre driftsstillingene. Videre kan en se ut fra kurvene at når samtlige spjeld i de fire nederste etasjene settes til minimum luftmengde i «driftsstilling 1» (17:30 – 19:00), blir reguleringsstrykket høyere. I «driftsstilling 2» (tidsrom 08:30 – 11:30), hvor de tre nederste etasjene ble stilt inn til å levere minimum luftmengde og de to øverste etasjene leverte full luftmengde, kan en se at reguleringsstrykket ble lavere i 3 etasje. «Nod71007», «Nod71004» og «Nod71041» er tilluftsventiler i 5. etasje. «Nod81038» og «Nod81007» er tilluftsventiler i 3. etasje. I tillegg til disse ventilene, som det også er fysisk målt på bygget, er det her inkludert en ventil fra 4. etasje, som viste seg å ha et lavere reguleringsstrykk enn ventilene det ble målt på i de to første driftsstillingene («Nod82086»).

Tidspunkt	Ventil	Driftsstilling	Registrert	Målt	Nedre	Øvre
			[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
18:20	Stikkprøve 1	1	86,4	85,56	80,43	90,69
18:20	Stikkprøve 2	1	78,2	82,54	77,59	87,5
18:20	Stikkprøve 3	1	82,2	80,57	75,73	85,4
11:32	Stikkprøve 1	2	80,5	93,47	87,87	99,08
11:32	Stikkprøve 2	2	73,5	79,62	74,85	84,4
11:32	Stikkprøve 3	2	78,2	78,3	73,61	83
14:57	Stikkprøve 1	3	52,5	49,28	46,33	52,24
14:57	Stikkprøve 2	3	38,9	48,72	45,79	51,64
14:57	Stikkprøve 3	3	39,9	47,68	44,82	50,54

Tabell 7 Målt og registrert reguleringstrykk

Tabell 7 viser registrerte og målte reguleringstrykk for de ulike stikkprøvene og driftsstillingene. De to kolonnene til høyre viser nedre og øvre verdi av det målte reguleringstrykket med hensyn til måleusikkerhet.

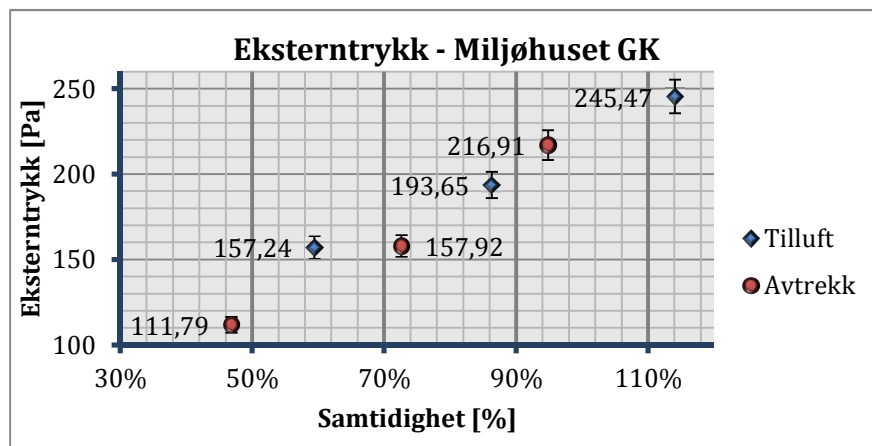


Figur 31 Logget reguleringstrykk fra Lindinspect ved tilfeldig ukedag. Skjermdump fra Lindinspect [63].

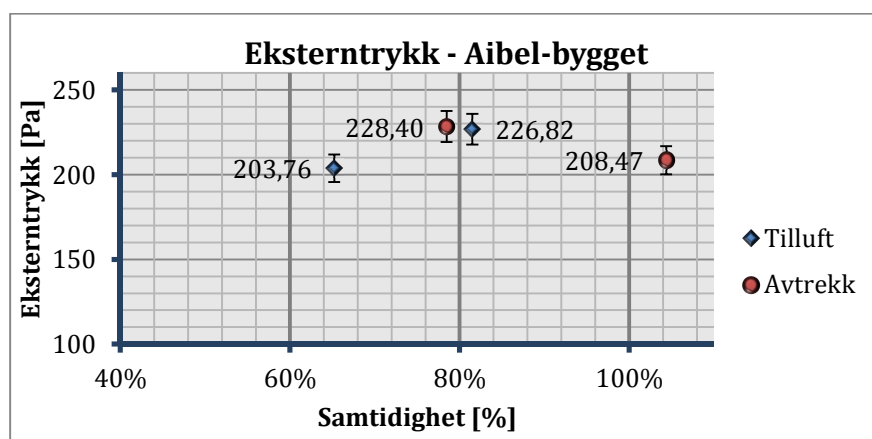
Ved Miljøhuset GK registreres reguleringstrykkene, og dette gjør at det er mulig å kontrollere målingene som er utført på den aktuelle måledagen. Figur 31 viser et skjermtutklipp fra Lindinvents nettbaserte program Lindinspect. Hver av kurvene viser reguleringstrykket for 5 utvalgte ventiler i de ulike etasjene, i en ukedag (dette er ikke fra dagen målingene ble utført). Den grønne og den lilla kurven viser at reguleringstrykket her ligger rundt 40 – 50 Pa.

4.2.4.3 – EKSTERNE TRYKKFALL

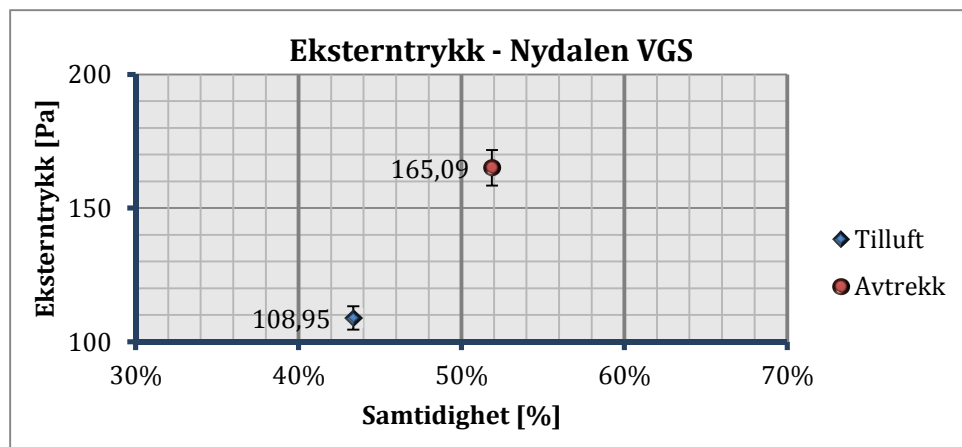
Figur 32 - Figur 35 viser målte eksterne trykkfall for på tillufts- og avtrekkssiden for de ulike samtidighetene ved henholdsvis Miljøhuset GK, Aibel-bygget, Nydalen VGS og Forskningsparken.



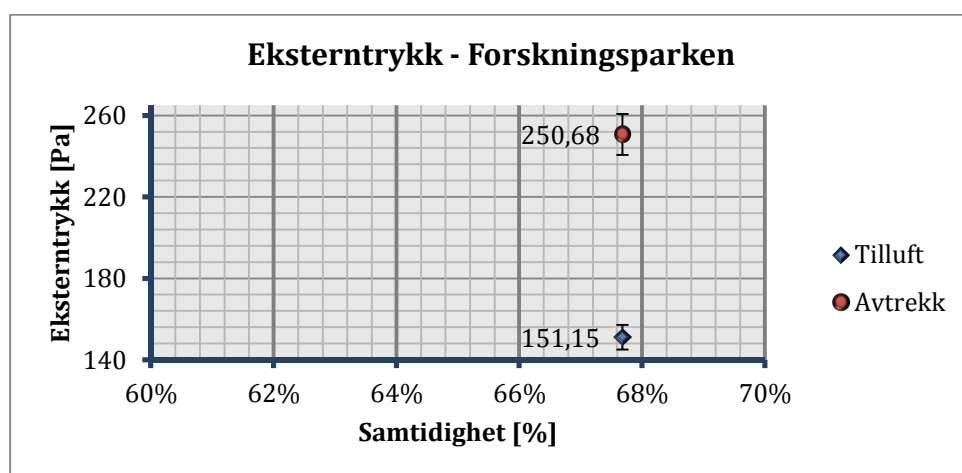
Figur 32 Målte eksterntrykk fra tillufts- og avtrekkssiden ved Miljøhuset GK.



Figur 33 Målte eksterntrykk fra tillufts- og avtrekkssiden ved Aibel-bygget.



Figur 34 Målt eksternt trykk fra tillufts- og avtrekkssiden ved Nydalen VGS



Figur 35 Målt eksternt trykk fra tillufts- og avtrekkssiden ved Forskningsparken

Bygg	Driftsstilling	Tilluftssiden		Avtrekkssiden	
		Trykkfall	Trykkoppb.	Trykkfall	Trykkoppb.
		[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
Aibel-bygget	1	203,76	379,8	228,40	410,3
Aibel-bygget	2	226,82	387,7	208,47	496,6
Miljøhuset GK	1	157,24	249,2	111,79	68,0
Miljøhuset GK	2	193,65	406,3	157,92	289,1
Miljøhuset GK	3	245,47	571,2	216,91	398,5
Nydalen VGS	1	108,95	312,6	165,09	299,6
Forskningsparken	1	151,15	367,1	250,68	416,2

Tabell 8 Målt eksternt trykkfall og trykkoppbygning på tillufts- og avtrekkssiden.

Tabell 8 viser de målte eksterne trykkfallene og trykkoppbygningene på henholdsvis tillufts- og avtrekkssiden ved de ulike byggene.

4.2.5 - STRØMNINGSEKSPONENT FOR KOMPONENTENE

4.2.5.1 – BEREGNEDE EKSPONENTER BASERT PÅ MÅLTE TRYKKFALL

Driftsstilling	1	2	Likning	Strømningseks.
Luftmengde – Tilluft	4240,06	5297,53		$1 \leq n \leq 2$
Filter: Trykkfall	36,71	38,18	$y = 8,4337x^{0,1761}$	0,18
Varmeveksler: Trykkfall	80,48	108,17	$y = 0,0012x^{1,3276}$	1,33
Varmebatteri: Trykkfall	46,63	48,88	$y = 7,9135x^{0,2123}$	0,21
Luftmengde – Avkast	5100,76	6783,21		
Filter: Trykkfall	41,33	113,07	$y = 3 \cdot 10^{-12} x^{3,531}$	3,53
Varmeveksler: Trykkfall	85,89	108,17	$y = 0,0859x^{0,8091}$	0,81

Tabell 9 Beregnede strømningseksponenter for ulike aggregatkomponenter ved Aibel-bygget.

Tabell 9 viser de målte trykkfallene over de ulike komponentene i ventilasjonsaggregatet i forhold til luftmengder ved Aibel-bygget. Over trykkfallene i kolonne to og tre fra venstre er luftmengdene gitt for tilluft og avkast. Trykkene er oppgitt i Pa og luftmengdene i m^3/h . I kolonne nummer fire fra venstre er likningen som er framkommet av forholdet mellom trykkfall og luftmengde for de to driftsstillingene. I kolonnen på høyre side i tabellen er strømningseksponentene gitt for de ulike komponentene. Strømningseksponentene skal i teorien ligge i området mellom 1 og 2. Det er her kun varmeveksleren som ligger innenfor dette intervallet.

Driftsstilling	1	2	3	Likning	Strømningseks.
Luftmengde - Tilluft	11893,68	17264,73	22818,02		$1 \leq n \leq 2$
Filter – Tilluft: Trykkfall	38,18	68,32	95,11	$y = 7 \cdot 10^{-5} x^{1,4094}$	1,41
Varmeveksler: Trykkfall	59,19	169,02	179,81	$y = 4 \cdot 10^{-6} x^{1,766}$	1,77
Varmebatteri: Trykkfall	15,71	44,17	67,72	$y = 9 \cdot 10^{-9} x^{2,2717}$	2,27
Luftmengde – Avkast	9372,25	14530,25	18969,91		
Filter: Trykkfall	17,77	35,04	50,06	$y = 2 \cdot 10^{-5} x^{1,4767}$	1,48
Varmeveksler: Trykkfall	45,15	96,19	151,35	$y = 7 \cdot 10^{-6} x^{1,7165}$	1,72

Tabell 10 Beregnede strømningseksponenter for ulike aggregatkomponenter ved Miljøhuset GK.

Tabell 10 viser tilsvarende resultater som i tabellen over, men her fra Miljøhuset GK. Her ligger alle strømningseksponentene innenfor området mellom 1 og 2 utenom varmebatteriet på tilluftssiden.

4.2.6 - STRØMNINGSEKSPONENTER I VENTILASJONSAGGREGAT

			Driftsstilling			Likning	Strømningseks.
			1	2	3		$1 \leq n \leq 2$
Miljøhuset GK							
Målt							
Tilluftssiden	Luftmengde	[m ³ /h]	11893,68	17264,73	22818,02	$y = 2E-06x^{1,8552}$	1,86
"	Trykkfall	[Pa]	78,23	168,52	260		
Avtrekssiden	Luftmengde	[m ³ /h]	9372,25	14530,25	18969,91	$y = 8E-05x^{1,4925}$	1,49
"	Trykkfall	[Pa]	64,09	131,23	181,58		

Tabell 11 Beregnede strømningseksponenter for aggregatet ved Miljøhuset GK.

Tabell 11 viser forholdet mellom trykkfall i aggregatet, som er beregnet fra før filter til etter varmeveksler, i forhold til luftmengder. Andre kolonne fra høyre viser likningen for linjen mellom punktene, og kolonnen på høyre sid viser strømningseksponenten.

			Driftsstilling		Likning	Strømningseksp.
			1	2		1 ≤ n ≤ 2
Aibel-bygget						
Målt						
Tilluftssiden	Luftmengde	[m ³ /h]	4240,06	5297,53	y = 2E-05x ^{1,8341}	1,83
"	Trykkfall	[Pa]	100,41	151,05		
Avtrekssiden	Luftmengde	[m ³ /h]	5100,76	6783,21	y = 0,0014x ^{1,323}	1,32
"	Trykkfall	[Pa]	114,84	167,44		
Målt lav						
Tilluftssiden	Luftmengde	[m ³ /h]	4240,06	5297,53	y = 0,0005x ^{1,4747}	1,47
"	Trykkfall	[Pa]	104,42	145,01		
Avtrekssiden	Luftmengde	[m ³ /h]	5100,76	6783,21	y = 0,0163x ^{1,0423}	1,04
"	Trykkfall	[Pa]	119,43	160,75		
Målt høy						
Tilluftssiden	Luftmengde	[m ³ /h]	4240,06	5297,53	y = 1E-06x ^{2,1936}	2,19
"	Trykkfall	[Pa]	96,39	157,09		
Avtrekssiden	Luftmengde	[m ³ /h]	5100,76	6783,21	y = 0,0001x ^{1,6038}	1,6
"	Trykkfall	[Pa]	110,24	174,14		

Tabell 12 Beregnede strømningseksponenter for aggregatet ved Aibel-bygget

Tabell 12 viser tilsvarende resultater som i Tabell 11, men resultatene er her fra Aibel-bygget. Øverst er resultat gitt for de målte verdiene ved Aibel-bygget, merket «Målt». Under disse resultatene finner en resultater fra «Målt lav» og «Målt høy», som er beregnet som beskrevet i 3.6.1 – Beregning av strømningsseksp. eksponent.

4.2.6.1 - BEREGNEDE EKSPONENTER BASERT PÅ SIMULERTE TRYKKFALL

Driftsstilling	1	2	Likning	Strømningsseks.
Luftmengde - Tilluft	4240,06	5297,53		$1 \leq n \leq 2$
Filter: Trykkfall	67	85	$y = 0,0089x^{1,0687}$	1,07
Varmeveksler: Trykkfall	82	112	$y = 0,0007x^{1,4002}$	1,40
Varmebatteri: Trykkfall	16	24	$y = 4 \cdot 10^{-6} x^{1,821}$	1,82
Luftmengde - Avkast	5100,76	6783,21		
Filter: Trykkfall	79	103	$y = 0,028x^{0,9306}$	0,93
Varmeveksler: Trykkfall	106	160	$y = 0,0005x^{1,4444}$	1,44

Tabell 13 Beregnede strømningsseksp. eksponenter for aggregatkomponenter fra simulering for Aibel-bygget i ProUnit.

Resultatene i Tabell 13 viser strømningsseksp. eksponentene for Aibel-bygget (se kolonne på høyre side) fra simuleringer for det aktuelle aggregatet i Swegons dimensjoneringsprogram ProUnit. Forholdet mellom trykkfall over komponentene og luftmengdene er bestemt gjennom laboratorieforsøk.

Driftsstilling	1	2	3	Likning	Strømningsseks.
Luftmengde - Tilluft	11893,68	17264,73	22818,02		$1 \leq n \leq 2$
Filter: Trykkfall	43	70	100	$y = 0,0002x^{1,296}$	1,30
Varmeveksler: Trykkfall	118	178	242	$y = 0,0038x^{1,1024}$	1,10
Varmebatteri: Trykkfall	33	63	103	$y = 3 \cdot 10^{-6} x^{1,7463}$	1,75
Luftmengde - Avkast	9372,25	14530,25	18969,91		
Filter: Trykkfall	33	56	79	$y = 0,0004x^{1,2349}$	1,23
Varmeveksler: Trykkfall	91	148	198	$y = 0,0038x^{1,1032}$	1,10

Tabell 14 Beregnede strømningsseksp. eksponenter for aggregatkomponenter fra simulering for Miljøhuset GK i SystemairCAD.

I Tabell 14 er resultatene for strømningsseksp. eksponentene for de ulike komponentene i aggregatet ved Miljøhuset GK fra simulering av aggregatet gjennom Systemairs programvare SystemairCAD.

Bygg	Side	Likning	Strømningseks.
Eks. varmebatteri:			
Aibel-bygget	Tilluftssiden	$y = 0,0042x^{1,2542}$	1,25
	Avtrekkssiden	$y = 0,0049x^{1,2341}$	1,23
Miljøhuset GK	Tilluftssiden	$y = 0,0031x^{1,1565}$	1,16
	Avtrekkssiden	$y = 0,0037x^{1,1394}$	1,14
Inkl. varmebatteri:			
Aibel-bygget	Tilluftssiden	$y = 0,0029x^{1,3124}$	1,31
Miljøhuset GK	Tilluftssiden	$y = 0,0012x^{1,2738}$	1,27

Tabell 15 Beregnede strømningseksponenter for aggregat, basert på simulering.

Tabell 15 viser strømningseksponentene på tilluft- og avtrekkssiden ved Aibel-bygget og Miljøhuset GK som er basert på de simulerte trykkfallene. Øverst vises resultat der varmebatteriet ikke er medregnet. I resultatene nederst er varmebatteriet inkludert ut utregningen.

4.2.7 - MÅLT TRYKKOPPBYGNING OG ANDEL EKSTERNT OG INTERNT TRYKKFALL

Bygg	Driftsstiling	Trykkoppbygning			
		Tilluft	Avtrekk	Totalt	Måleusikkerhet
		[Pa]	[Pa]	[Pa]	[%]
Aibel-bygget	1	379,84	410,27	790,11	6 %
Aibel-bygget	2	387,69	496,64	884,33	6 %
Miljøhuset GK	1	249,2	68,02	317,22	6 %
Miljøhuset GK	2	406,34	289,15	695,49	6 %
Miljøhuset GK	3	571,23	398,49	969,72	6 %
Nydalen VGS	1	312,61	299,55	612,16	6 %
Forskningsparken	1	367,08	416,16	783,24	6 %

Tabell 16 Målt trykkoppbygning over vifter.

Tabell 16 presenterer resultater fra måling av trykkoppbygning over viftene. I kolonnene markert «Tilluft» og «Avtrekk» finnes resultatene for trykkoppbygning over henholdsvis tilluftsvifte og avtrekksvifte. Kolonnen merket «Totalt» gir summen av trykkoppbygning over tillufts- og avtrekksviftene, med tilhørende avvik i kolonnen på høyre side av tabellen.

Bygg	Driftsstilling	Prosentfordeling trykkfall	
		Eksternt	Internt
		[%]	[%]
Aibel-bygget	1	55 %	45 %
Aibel-bygget	2	49 %	51 %
Miljøhuset GK	1	85 %	15 %
Miljøhuset GK	2	50 %	50 %
Miljøhuset GK	3	47 %	53 %
Nydalen VGS	1	45 %	55 %
Forskningsparken	1	51 %	49 %

Tabell 17 Målt fordeling mellom trykkfall internt i aggregat og eksternt i kanalnettet.

Tabell 17 viser fordeling mellom det målte eksterne og interne trykkfallet i ventilasjonsanleggene. Det er tilnærmet lik fordeling med unntak av Miljøhuset GK, driftsstilling 1, hvor trykkoppbygningen ble målt meget lav og dette får utslag i dette resultatet.

4.2.8 – BEREGNET DIMENSJONERENDE EKSTERN- OG REGULERINGSTRYKK

Tabell 18 og Tabell 19 viser resultatene fra beregning av det dimensjonerende eksterstrykket og reguleringstrykket som gjør formelen i Tillegg H [5] best tilpasset resultatene fra målingene som er utført ved de ulike byggene. Følgende data er presentert:

dP_ext	= Største målte eksterstrykk av tillufts- og avtrekksside
dP_vifte	= Sum trykkoppbygning over tillufts- og avtrekksvifte
dP_ext,dim	= Beregnet dimensjonerende eksterstrykk
dP_reg (%)	= Beregnet prosentandel reguleringstrykket utgjør av det dimensjonerende eksterstrykket
dP_reg	= Beregnet reguleringstrykk
dP_ext,s	= Beregnet eksterstrykk (tilluft eller avtrekk)
dP_f,i	= Beregnet trykkoppbygning over tillufts- og avtrekksviftene
Avvik	= Minste avvik mellom dP_f,i og dP_vifte

Bygg	Driftsstilling	Målt		Beregnet					Avvik
		dP_ext	dP_vifte	dP_ext,dim	dP_reg%	dP_reg	dP_ext,s	dP_f,i	
		[Pa]	[Pa]	[Pa]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	
Aibel-bygget	1	203,8	790,11			222,39	222,39	734,68	55,43
Aibel-bygget	2	226,8	884,33	222,39	100 %	222,39	222,39	884,33	0,00
Miljøhuset GK	1	157,2	317,22			103,68	139,90	478,91	161,69
Miljøhuset GK	2	193,6	695,49			103,68	180,00	695,49	0,00
Miljøhuset GK	3	245,5	969,72	206,10	50 %	103,68	236,99	969,72	0,00
Nydalen VGS	1	165,1	612,16	305,74	56 %	170,85	200,42	612,16	0,00
Forskningsparken	1	151,2	783,24	313,50	39 %	122,70	210,11	783,24	0,00

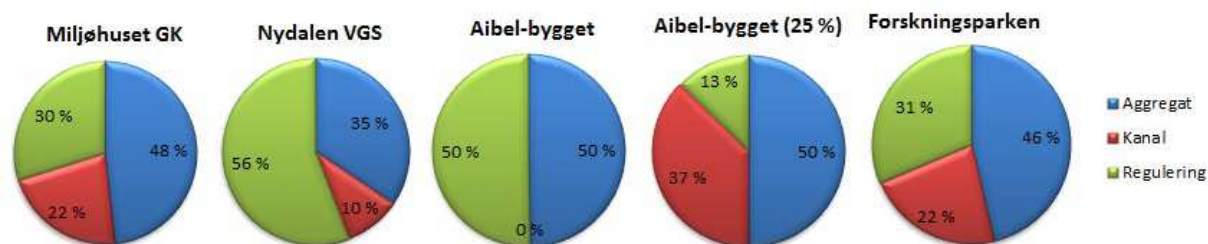
Tabell 18 Tilpasset dimensjonerende eksternt trykk og reguleringstrykk for beregning av SFP ved strømningssekspont lik 1,4.

Tabell 18 viser beregnet dimensjonerende eksternt trykkfall og reguleringstrykk som passer til modellen for å gjøre avviket mellom målt og beregnet trykkoppbygning over viftene lavest mulig. Målt og beregnet eksternt trykkfall er markert med rødt og trykkoppbygning med blått. Strømningsseksponten er satt lik 1,4.

Bygg	Driftsstilling	Målt		Beregnet					Avvik
		dP_ext	dP_vifte	dP_ext,dim	dP_reg%	dP_reg	dP_ext,s	dP_f,i	
		[Pa]	[Pa]	[Pa]	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	
Aibel-bygget	1	203,8	790,11			55,60	146,09	582,08	208,03
Aibel-bygget	2	226,8	884,33	222,39	25 %	55,60	219,60	878,75	5,58

Tabell 19 Beregning av hva eksternt trykk og trykkoppbygning over vifte bør være for at reguleringstrykket skal utgjøre 25 % av dimensjonerende eksternt trykk.

Tabell 19 viser beregning av eksternt trykk og viftenes totale trykkoppbygning hvor reguleringstrykket manuelt er satt til å utgjøre 25 % av dimensjonerende eksternt trykk. Dette gjør at reguleringstrykket blir på 55,60 Pa, som er nær det målte reguleringstrykket. For samtidighet på 99,2 % blir da både eksternt trykkfall og trykkoppbygning over viftene i ganske likt med det som er målt. For driftsstillingen med 73,7 % samtidighet derimot, blir avvikene store mellom de målte og beregnede verdiene.



Figur 36 Fordeling av trykkfall fra beregning.

Figur 36 viser hvordan fordelingen er mellom trykkfall i ventilasjonsaggregat, kanalsystem og reguleringstrykket for de ulike byggene beregnet i Tabell 18 og Tabell 19. I tillegg vises fordelingen for tilfellet hvor reguleringstrykket ved Aibel-bygget er satt lik 25 % av eksterstrykket.

4.2.9 - BEREGNET SFP I HENHOLD TIL REVISJON AV NS 3031, TILLEGG H

I Tabell 20 til Tabell 23 er konstanten k antatt å være 5. Reguleringstrykk og eksterstrykk er hentet fra resultater presentert i kapittel 4.2.8 – Beregnet dimensjonerende eksternt- og reguleringstrykk.

Miljøhuset GK					
Dimensjonerende luftmengde	V_{dim}	[m ³ /h]	20000	20000	20000
Brutto luftmengde ved aktuelt driftspunkt	V_i	[m ³ /h]	11894	17265	22818
Samtidighet	S_i	[-]	0,59	0,86	1,14
Reguleringstrykkfall	Δp_{reg}	[Pa]	103,68	103,68	103,68
Dimensjonerende eksternt trykkfall	$\Delta p_{ext,dim}$	[Pa]	206,10	206,10	206,10
Konstant (forhold mellom η og q)	k	[-]	5	5	5
Dimensjonerende SFP	SFP_{dim}	[kW/(m ³ /s)]	1,2	1,2	1,2
Total virkningsgrad for viftesystem	$\eta_{f,i}$	[-]	0,66	0,68	0,69
Sum trykkoppbygning over viftene	$\Delta p_{f,i}$	[Pa]	479	696	970
SFP ved ulike reduserte luftmengder	$SFP_{e,i}$	[kW/(m³/s)]	0,7	1,0	1,4

Tabell 20 Beregnede SFP-verdier for Miljøhuset GK.

Tabell 20 viser beregning av SFP ved de ulike driftsstillingene ved Miljøhuset GK i henhold til utkast for Tillegg H. Dimensjonerende SFP er hentet fra FDV-dokumentasjon for ventilasjonsaggregatet.

Aibel-bygget				
Dimensjonerende luftmengde	V _{dim}	[m ³ /h]	6500,00	6500,00
Brutto luftmengde ved aktuelt driftspunkt	V _i	[m ³ /h]	4788	6445
Samtidighet	S _i	[-]	0,74	0,99
Reguleringstrykkfall	Δp _{reg}	[Pa]	55,60	55,60
Dimensjonerende eksternt trykkfall	Δp _{ext,dim}	[Pa]	222,39	222,39
Konstant (forhold mellom η og q)	k	[-]	5	5
Dimensjonerende SFP	SFP _{dim}	[kW/(m ³ /s)]	1,69	1,69
Total virkningsgrad for viftesystem	η_{f,i}	[-]	0,52	0,53
Sum trykkoppbygning over viftene	Δp_{f,i}	[Pa]	582	879
SFP ved ulike reduserte luftmengder	SFP_{e,i}	[kW/(m³/s)]	1,1	1,7

Tabell 21 Beregnede SFP-verdier for Aibel-bygget.

Tabell 21 viser utregnet SFP ved de to driftsstillingene ved Aibel-bygget etter Tillegg H.

Reguleringstrykket er hentet fra eksempelet der det utgjør 25 % av dimensjonerende eksternt trykkfall.

Forskningsparken			
Dimensjonerende luftmengde	V _{dim}	[m ³ /h]	50000
Brutto luftmengde ved aktuelt driftspunkt	V _i	[m ³ /h]	33841
Samtidighet	S _i	[-]	0,68
Reguleringstrykkfall	Δp _{reg}	[Pa]	122,70
Dimensjonerende eksternt trykkfall	Δp _{ext,dim}	[Pa]	313,50
Konstant (forhold mellom η og q)	k	[-]	5
Dimensjonerende SFP	SFP _{dim}	[kW/(m ³ /s)]	2
Total virkningsgrad for viftesystem	η_{f,i}	[-]	0,61
Sum trykkoppbygning over viftene	Δp_{f,i}	[Pa]	783
SFP ved ulike reduserte luftmengder	SFP_{e,i}	[kW/(m³/s)]	1,3

Tabell 22 Beregnet SFP-verdi for Forskningsparken.

Tabell 22 viser beregnet SFP ved Forskningsparken for driftsstillingen det ble målt ved.

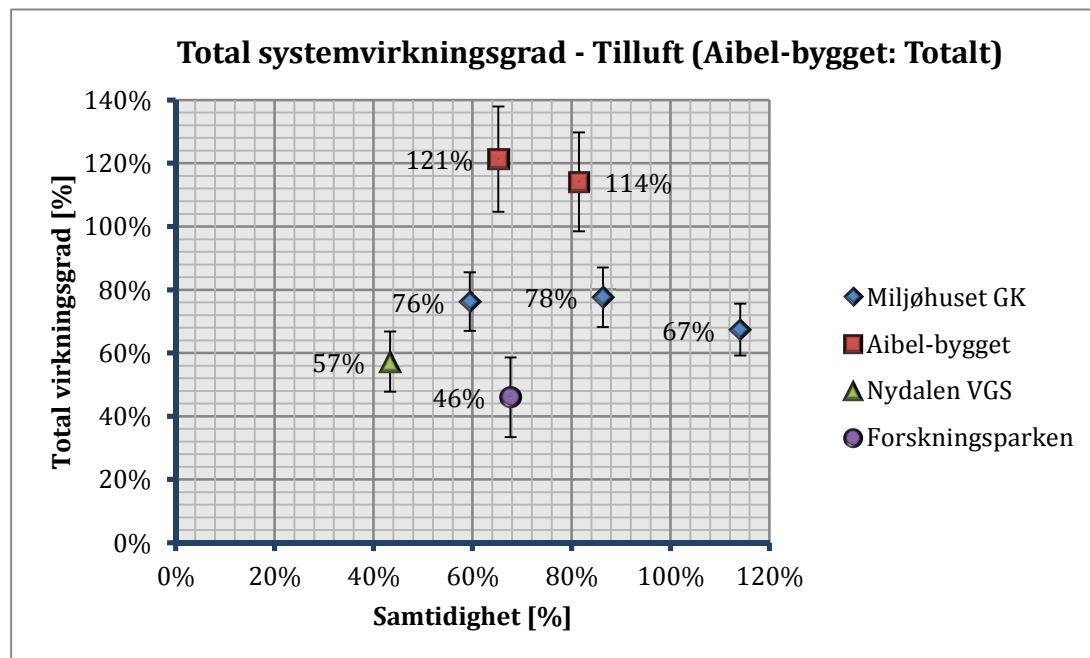
Dimensjonerende SFP er antatt, og satt lik 2 som er minimumskravet i Byggeteknisk forskrift [64].

Nydalens VGS			
Dimensjonerende luftmengde	V_{dim}	[m ³ /h]	28440
Brutto luftmengde ved aktuelt driftspunkt	V_i	[m ³ /h]	13315
Samtidighet	S_i	[-]	0,47
Reguleringstrykkfall	Δp_{reg}	[Pa]	170,85
Dimensjonerende eksternt trykkfall	$\Delta p_{ext,dim}$	[Pa]	305,74
Konstant (forhold mellom η og q)	k	[-]	5
Dimensjonerende SFP	SFP_{dim}	[kW/(m ³ /s)]	1,5
Total virkningsgrad for viftesystem	$\eta_{f,i}$	[-]	0,74
Sum trykkoppbygning over viftene	$\Delta p_{f,i}$	[Pa]	612
SFP ved ulike reduserte luftmengder	$SFP_{e,i}$	[kW/(m³/s)]	0,8

Tabell 23 Beregnet SFP-verdi for Nydalens Videregående skole.

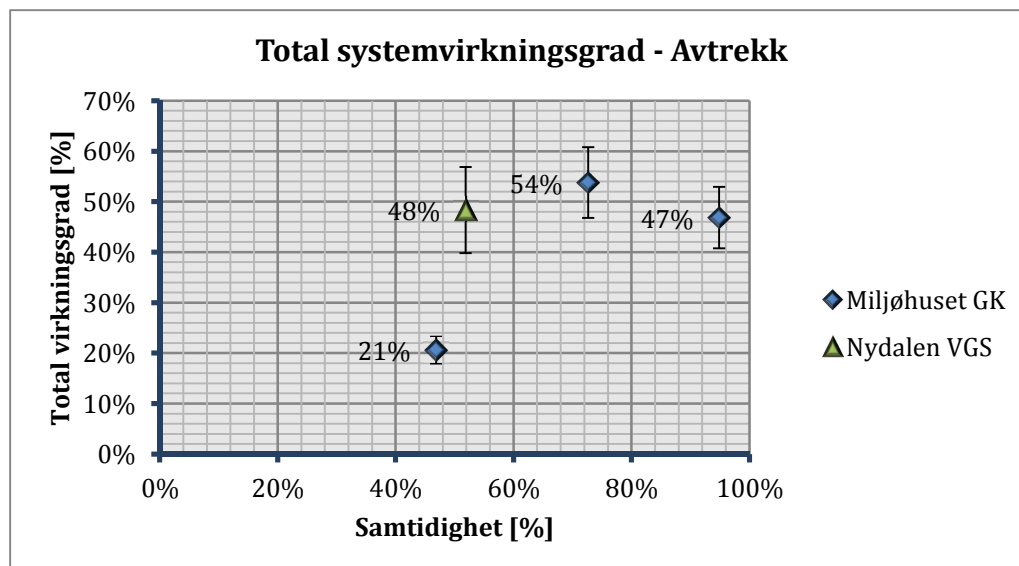
Tabell 23 viser beregnet SFP for driftsstillingen ved Nydalens Videregående skole.

4.2.10 - TOTAL SYSTEMVIRKNINGSGRAD (STATISK)



Figur 37 Beregnet total systemvirkningsgrad for tilluftsvifte, basert på målte verdier.

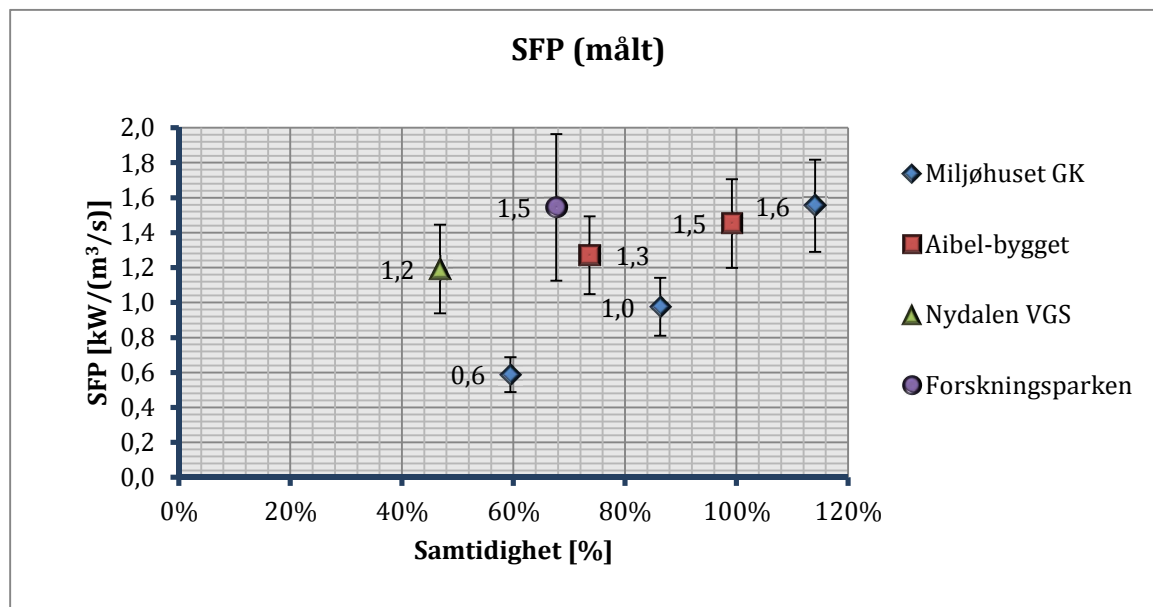
Figur 37 viser virkningsgraden for tilluftsviftene ved de ulike byggene og ulike driftsstillinger. Virkningsgradene er beregnet fra målte verdier av trykkoppbygning over viften, luftmengde og effekt. For Aibel-bygget gjelder virkningsgradene som er oppgitt for både tillufts- og avtrekksviftene.



Figur 38 Beregnet total systemvirkningsgrad for avtrekksvifte, basert på målte verdier.

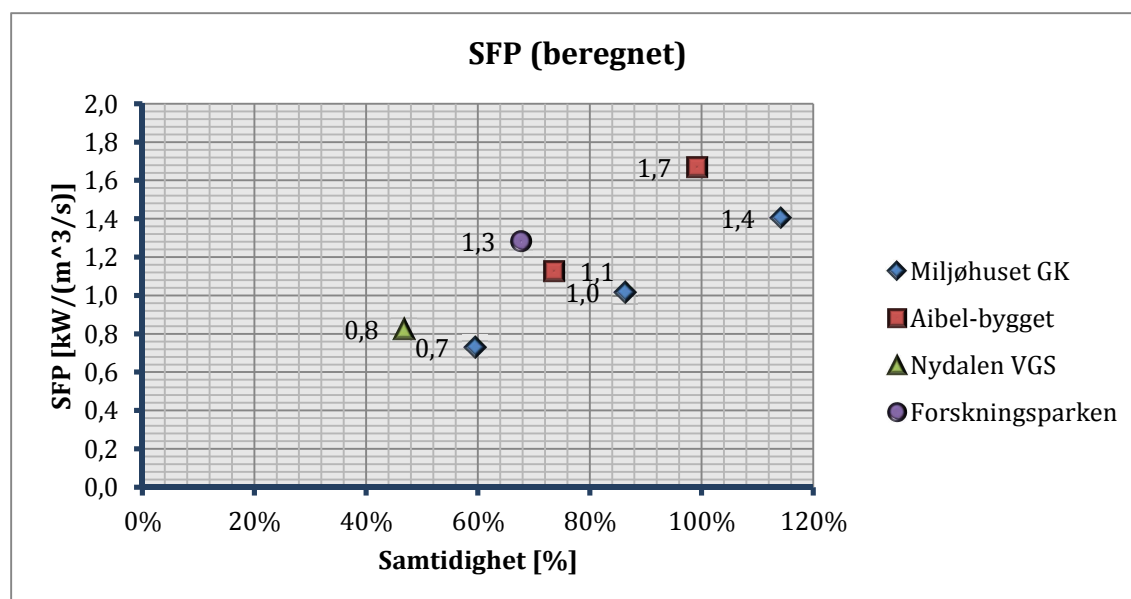
Tilsvarende viser Figur 38 de beregnede virkningsgradene for avtrekksviftene ved Miljøhuset GK og Nydalen Videregående skole.

4.2.11 - SAMMENLIGNING AV SFP FRA MÅLING OG BEREGNINGSMODELL



Figur 39 Beregnede SFP-verdier basert på målinger.

Figur 39 viser resultatene fra beregnet SFP fra målte luftmengder og effekt. Her er alle byggene presentert og de ulike driftsstillingene for Miljøhuset GK og Aibel-bygget i forhold til samtidighet.



Figur 40 Beregnede SFP-verdier fra utkast til revisjon av NS 3031, Tillegg H.

Figur 40 vises resultatene for beregnet SFP i henhold til utkast til revisjon av NS 3031, Tillegg H [5]. I figuren er resultatene for de ulike byggene og driftsstillingene presentert i forhold til samtidighet. StrømningsekspONENTEN er satt til 1,4 og k er antatt lik 5 for samtlige bygg.

5 - DISKUSJON

Målet med dette prosjektet var å kartlegge hvilke parametere som bør inngå i en enkel beregningsmodell for valg av energioptimale, behovsstyrte ventilasjonsanlegg. Videre skulle det gis forslag til verdier som kan inngå i beregning av SFP i revisjon av NS 3031, Tillegg H.

5.1 - PARAMETERE SOM BØR INNGÅ I ENKEL BEREGNINGSMODELL

I kapittel «4.1 – Kartlegging av aktuelle parametere for enkel beregningsmodell» er det presentert resultater fra litteratursøk, for å finne ut hva som utgjør energibehovet i et ventilasjonsanlegg. Det er sett nærmere på hvilke parametere som vil variere mellom ulike system, og hvilke som i liten grad endres. Det har ikke vært en del av prosjektet å bestemme hvordan beregningsmodellens sammensetning bør være i detalj, men å finne fram til parametere som vil være viktige å ha med. Det er ønskelig at brukeren av beregningsmodellen skal kunne, på en tydelig måte, se konsekvenser av valg i form av endringer i energibehovet for ventilasjonsanlegget. For å få fram betydningen av valgene en tar gjennom beregningsmodellen, må de parameterne som har størst innvirkning inngå. I litteratursøket er det forsøkt å få fram informasjon som kan belyse hvilke parametere en bør ha

fokus på. Det er også kommet fram til forslag til enkelte beregningsmetoder som kan benyttes. Dette er gjort med tanke på at antall inndata som kreves av brukeren skal begrenses, ettersom at dette i utgangspunktet skal være en enkel beregningsmodell.

I tidlig fase av et prosjekt vurderes ulike alternativ. LCC-analyse er en fin måte å sammenligne ulike løsninger og valg på. Dette vil få fram innvirkningene av valgene en tar, hvor man kan sette de ulike valgene opp mot hverandre og sammenligne. Selv om en løsning i utgangspunktet gir lavere investeringskostnader, er det likevel mulighet for at en annen løsning gir lavere kostnader når en tar hele installasjonens levetid i betraktning. Dette kan være et godt argument for å få gjennomslag for en løsning som er energioptimal, men ikke nødvendigvis billigste investering ved innkjøp. I tillegg kan en medregne vedlikeholdskostnader, hvis de ulike løsningene for eksempel har ulik krav til ettersyn.

Det er ikke nødvendig å ta med parametere hvor energibehovet forholder seg tilnærmet likt, uavhengig av valgt løsning. Energi til drift av varmeveksler og automatisering av tekniske installasjoner vil i liten grad variere mellom ulike systemer, og dermed vil ikke disse være utslagsgivende når ulike løsninger sammenlignes. Energi til pumpene som transporterer væske til batterier vil variere i forhold til valg av motortype og reguleringsmetode, og energien vil reduseres ved redusert luftmengde. Det er ikke gjort spesifikke forsøk på å finne ut hvor mye pumpeenergi utgjør i dette prosjektet, men i resultatene fra SIMIEN-simuleringen presentert i Figur 20 og Figur 21 utgjør energi til samtlige pumper i disse eksemplene lite i forhold til det totale energibudsjettet. Likevel - når bygninger bygges etter passivhusstandard eller bedre, vil pumpeenergien utgjøre en større andel enn i disse simuleringene, ettersom at andre energiposter da vil bli betydelig redusert.

For å kunne gjøre energiberegninger må en ta hensyn til ventilasjonsanleggets samtidighet og tilstedeværelser. Her er det den antatt gjennomsnittlige samtidigheten som skal benyttes. Prosjektrapport 42 gir en enkel metode å beregne gjennomsnittlige luftmengder på for ulike bygningskategorier, og denne inngår også i den nye passivhusstandarden for yrkesbygg; NS 3701. Det er viktig å presisere at når ventilasjonsanlegget skal dimensjoneres, må det benyttes en antatt maksimal samtidighet. Man må altså prøve å finne ut hvor stor belastning vil man kunne oppleve i bygget. Denne vil kunne variere med hva slags bygning det gjelder og hvem som bruker det. Samtidighet og tilstedeværelse er altså viktig å ta med i beregningen, da dette vil redusere luftmengdene i forhold til et CAV-anlegg.

Når det gjelder valg av sensor, vil også dette være med på å bestemme hvor mye luftmengdene reduseres. I enkelte bygg kan det være det benyttes bevegelses- og temperatursensor i for eksempel celle-kontor og CO₂-sensor i møterom. Det finnes mange ulike kombinasjoner, og det vil være vanskelig å avgjøre luftmengdereduksjonen for hver enkelt kombinasjon. Strategiske løsningen for

hvordan luftmengdene reguleres etter CO₂- og IR-sensorenes signaler vil også gi utslag på reduksjonen av luftmengdene. Det kan være vanskelig å integrere dette inn i en beregningsmodell. For å muliggjøre dette, bør det først utføres ytterligere forskning på besparelse ved ulike styresystem i kombinasjon med forskjellige typer sensorer. I dette prosjektet har jeg ikke hatt som mål å gi svar på dette spørsmålet gjennom målingene som ble utført. For å kunne sammenligne systemer opp mot hverandre på den måten, er det nødvendig å utføre målinger med identiske utgangspunkt. Alle anleggene det ble målt ved hadde ulike parametere de styrte etter og ulike forutsetninger. Selv om dette ikke var mulig å gjennomføre i dette prosjektet, kan en likevel gjøre seg noen tanker om hva som i prinsippet vil kunne være med på å utgjøre forskjellene. Forskjellen vil avhenge av hvilket system som klarer å levere den luftmengden som er best tilpasset behovet i rommet eller sonen. Ved bruk av to-posisjonsspjeld holdes luftmengdene i prinsippet konstant ved tilstedeværelse. Ved Forskningsparken og Nydalen Videregående skole er det ikke tilbakemelding på om rommene får den luftmengden de ber om. Målekors for luftmengdemåling kan tettes igjen av støv og gi feilaktig trykkfallsmåling og dermed regulere ukorrekt luftmengde. Videre kan luftlekkasje i kanalnettet gjøre at luften ikke kommer helt frem dit den var ment. Type VAV-enheter, enten de er integrert i ventilene eller plasser i kanalen før ventilen, vil kreve ulike trykkfall over måleenhet for å kunne regulere luftmengdene innenfor rimelig nøyaktighet. Hvor mye luftmengdene kan reduseres er altså også avhengig av hvilke spesifikasjoner spjeldene har.

Hvis vi ser for oss et cellekontor hvor tilstedeværelse kun registreres gjennom bruk av bevegelsesdetektor (IR), vil lite skille mellom de ulike systemene slik utførelsen var ved ventilasjonssystemene på de utvalgte byggene. Ved Aibel-bygget, som benytter Swegons Super WISE-system, ville da hvert av spjeldene åpnet opp ved tilstedeværelse og stenge ned til å gi minimum luftmengde når det ikke var noen tilstede. Deretter ville viftene motta et nytt trykksettpunkt, og trykket i grenkanalene ville hold en ønsket predefinert verdi. Lindinvent-ventilene ved Miljøhuset GK ville også ha åpnet opp til å gi ønsket maksimum luftmengde, og minimum luftmengde uten tilstedeværelse. Tilsvarende vil ventilene ved Forskningsparken og Nydalen Videregående skole åpne opp ved tilstedeværelse.

Forskjellen blir tydeligere når det styres etter CO₂-nivået og temperaturen i rommet. Her vil Lindinvent- og ADAPT Colibri-ventilene kunne benytte trinnløs regulering mellom minimum og maksimum posisjon ettersom CO₂-nivået og/eller temperaturen i rommet øker. Ved Forskningsparken og Nydalen VGS vil luftmengdene settes i maksimum-posisjonen når CO₂-nivået går over en definert øvre ppm-verdi, eller at romtemperaturen når en viss temperatur. Når luftmengdene reduseres er det viktig å ta hensyn til strømningsmønsteret som vil oppstå i rommet for å unngå trekk. Tilføres det undertemperert luft vil denne luften falle raskere, som kan være

ubehagelig for personer som sitter like under denne luftstrømmen. Dermed er det viktig å opprettholde kastelengden på luften ut fra ventilen selv om luftmengden reduseres. Lindinvents ventiler har en god løsning på dette, ettersom at ventilåpningen gjøres mindre ved lavere luftmengder og dermed opprettholdes hastigheten ut fra ventilen.

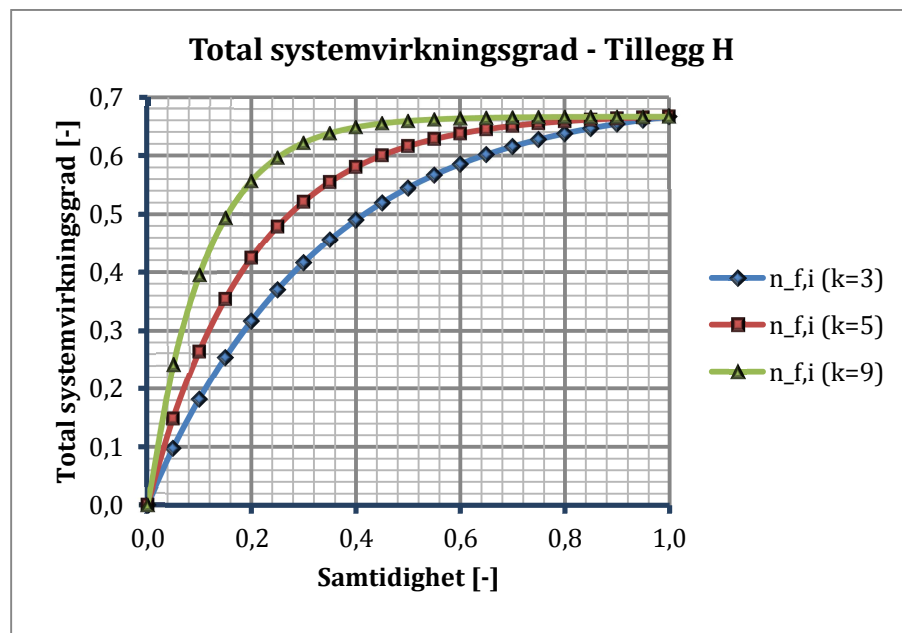
Resultatene fra SIMIEN-simuleringene for referanseskolebygget viste at med høy temperaturvirkningsgrad (85 %) på varmegjenvinningen utgjør energibehovet til vifter og klimatisering av ventilasjonsluft omtrent det samme. Det samme gjelder for referansekontorbygget. Det er i disse simuleringene gjort antagelser om gode temperaturvirkningsgrader og spesifikke vifteeffekter. Resultatene viser at når temperaturvirkningsgraden er lavere (70 %), vil ventilasjonsvarme utgjøre en vesentlig større andel av det årlige energibudsjettet. Simuleres det med en vifte som har høyere SFP-verdi, vil dette igjen føre til at viftes energi utgjør en større andel. Ulike typer varmevekslere kan oppnå ulik maksimal temperaturvirkningsgrad. Roterende varmevekslere kan for eksempel oppnå høyere virkningsgrad enn en platevarmeveksler. Valg av type varmeveksler vil altså påvirke energibehovet. Virkningsgraden vil også i stor grad være avhengig av temperatur på uteluften, avtrekksluften og tilluften, samt hastigheten på luften som passerer veksleren.

Som en ser ut fra litteraturen som er presentert i kapittel 4.1.6 – Valg av vifte, er det flere viktige grunner for å velge riktig viftestørrelse. Selv om det kan virke betryggende å ta litt ekstra i når man dimensjonerer viftestørrelsen, fører det altså til at anlegget opererer dårligere enn hva som er mulig å oppnå. Hvis en vil holde mulighetene åpne for senere å kunne utvide ventilasjonsaggregatets kapasitet, vil en mulig løsning være å installere et aggregat med et tverrsnitt som vil kunne klare større luftmengder. Viftene derimot bør dimensjoneres for å kunne drifte nær maksimal virkningsgrad. Hvis det senere blir et behov for å utvide kapasiteten, kan større vifter settes inn. Større arealtverrsnitt i aggregatet vil gi mindre motstand og dermed lavere trykkfall. Med andre ord vil det være med på å redusere energibehovet for viftene. Prosjektrapport 73 [11] foreslår å sette av plass i teknisk rom til et tilleggsaggregat for senere å ha mulighet for ytterligere kapasitet. Videre presiseres det at dette i dag ikke er vanlig praksis, men at det kan være en mulig måte å sikre optimale driftsforhold. Hvis det velges en vifte som store deler av tiden drifter med virkningsgrad lavere enn 10 % av maksimal virkningsgrad, vil dette gi utslag på energibehovet til viften. Dette bør også gjenspeiles i beregningsmodellen. Når viftens virkningsgrad synker ved enten redusert eller økt luftmengde i forhold til luftmengden hvor viften oppnår beste virkningsgrad, vil SFP-verdien øke. Gjennom å beregne årsgjennomsnittlig SFP, kan man se hvordan det årlige energibehovet endres ved å sammenligne en vifte som drifter utenfor optimalt område og en som drifter innenfor. Viftene er en av de større støykildene i et ventilasjonsanlegg. Det stilles krav til støy fra bygningstekniske

installasjoner i Byggteknisk forskrift [65]. Selv om det vil være vanskeligere å belyse støynivå ved valg av vifte, vil det likevel ivaretas en støyreduksjon hvis viftestørrelsen velges for optimalisert drift.

I utkastet til revisjonen av Tillegg H i NS 3031, oppgis formelverk for beregning av SFP ved ulike driftspunkt på en forenklet måte. Formel 26 er en tilnærming for å beregne trykkfallet i ventilasjonsanlegget. Denne beregningen gir mulighet for å fastsette et trykkfall uten å måtte tegne kanalnett og utføre simuleringer, noe som passer bra inn i en enkel beregningsmodell. Her antas det at trykkfallet på tillufts- og avtrekkssiden er likt, og at det interne trykkfallet i aggregatet er det samme som det eksterne trykkfallet i kanalsystemet. For å gjøre denne beregningen mer realistisk, er reguleringsstrykk, dimensjonerende eksternt trykkfall og strømningssekspONENTEN i ventilasjonsaggregatet beregnet basert på målte verdier ved eksisterende behovsstyrte ventilasjonsanlegg.

Den andre variabelen som inngår i SFP-beregningen er den totale systemvirkningsgraden for viftene, som kan beregnes etter Formel 28. Konstanten k i formelen bestemmer hvor raskt virkningsgraden stiger når samtidigheten øker. Figur 41 illustrerer hvordan virkningsgradene endres med samtidigheten for tre ulike konstanter ($k = 3$, $k = 5$ og $k = 9$). Her kan man se at kurvene flater ut når den når maksimal virkningsgrad.



Figur 41 Kurver for total systemvirkningsgrad hvor konstanten k endres, beregnet etter formel i utkast til revisjon av NS 3031 Tillegg H.

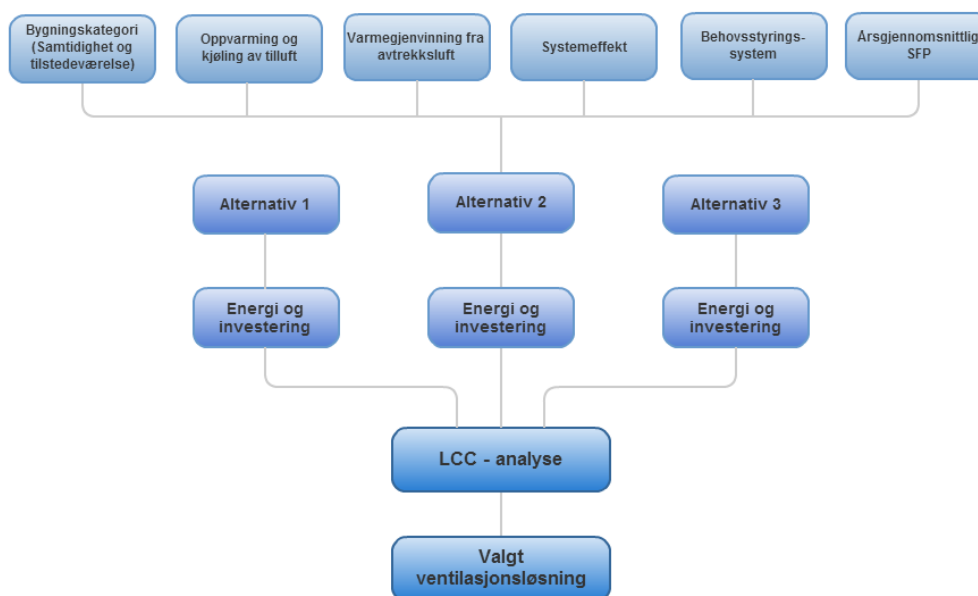
Kurvetilpasningen for beregningsmodellen bør i beregningsmodellen beskrive forholdet mellom luftmengder og virkningsgrad der det tas hensyn til at viftens virkningsgrad reduseres ved luftmengder høyere enn luftmengde ved maksimal ytelse. Ettersom at den totale virkningsgraden er

et produkt av viftens, motorens og frekvensomformerens virkningsgrader, vil også den totale systemvirkningsgraden reduseres. For at man skal kunne se utslaget av å velge for eksempel en for stor vifte, bør det benyttes kurvetilpasninger der virkningsgraden synker etter å ha nådd sin maksimale virkningsgrad. Den maksimale virkningsgraden vil kunne framkomme av valget av type vifte gjennom FMEG eller en tilsvarende klassifisering. Dette forutsetter selvfølgelig at vifteprodusentene benytter seg av denne klassifiseringen, slik at vifte- og motorkombinasjonen oppgis med en maksimal virkningsgrad. I klassifiseringen bør virkningsgraden beregnes i kombinasjon med en frekvensomformer, slik at det er den totale systemvirkningsgraden som oppgis. Ettersom at SFP skal beregnes med største luftmengde av tilluft og avtrekk, er det viktig å skille mellom luftmengden som går over avtrekksviften til avkast og avtrekksluftmengden. Beregningen av samtidigheten i Formel 30, bør det tas hensyn til luftlekkasje gjennom renblåsningssektor. Ved å gjøre et fratrekk på luftmengden som vil gå over avtrekksviften som tilsvarer luftlekkasjen, regner man da med avtrekksluftmengde.

Systemeffekten kan være høyst aktuell å implementere i beregningmodellen. Metoden som er presentert i AMCA Publication 201-02 [62] kan benyttes for å beregne hva systemeffekten vil utgjøre i form av energi. Ved å legge inn avstander til komponent eller bend før og etter aggregatet, kan systemeffekten beregnes. En vil da se hvor viktig det er å oppnå fullt utviklet hastighetsprofil, i form av at energibehovet endres når den effektive lengden forandres. Dette kan gi resultater som kan virke som argumentasjon for å utvide tilgjengelig plass i teknisk rom.

Selv om denne beregningsmodellen vil kunne være med på å gjøre det enklere å ta valg i prosjektering av et ventilasjonsanlegg, kan ikke alle aspekter tas høyde for. Det er viktig å ha gjennomtenkte føringsveier med færrest mulig motstander som fører til trykkfall. Ved plassering av spjeld og andre komponenter i kanalnettet bør det sikres tilstrekkelig avstand før og etter enhetene. Disse avstandene oppgis ofte i produktdata fra produsenten av den enkelte komponent. I systemer hvor regulering av luftmengder avhenger av signal fra en trykkløser, er plassering av denne føleren viktig å vurdere. Ved plassering på ugunstige steder hvor strømningsbildet er ustabilt, kan det gi feilaktige signaler tilbake til styringsenheten. Beregningsmodellen vil være aktuell for både planlegging og dimensjonering av ventilasjonsanlegg. Som en del av planleggingen må det i modellen tas stilling til hvilken type styringsprinsipp det ønskes å bruke for det enkelte bygget. Videre vil LCC-analysen (Life Cycle Cost) kunne sammenligne ulike alternativ opp mot hverandre. Modellen vil også kunne ta for seg en meget viktig del av dimensjoneringen – nemlig bestemmelse av viftestørrelsen. Ved å kunne prøve seg fram med ulike viftestørrelser som resulterer i ulikt energibehov for det enkelte bygget, vil det bli enklere å se viktigheten av å velge riktig størrelse og de økonomiske konsekvensene det vil medføre.

Figur 42 viser et forslag til prinsipiell oppbygning av beregningsmodellen. Hver alternative løsning benytter de samme parameterne, men med ulike inndata for de komponentene det varieres mellom. Dette vil danne grunnlaget for en energiberegning for hvert av alternativene. Ved å endre inndataene for parameterne, vil en kunne se hvordan antall kWh endrer seg. Denne energien kan enkelt gjøres om til kroneverdi ved å multiplisere med en angitt kWh-pris. Ved å inkludere investeringskostnadene i en LCC-analyse, kan de ulike løsningene settes opp mot hverandre for å finne den beste løsningen.



Figur 42 Forslag til prinsipiell oppbygning av beregningsmodell [Modell laget på www.gliffy.com]

5.2 – FORSLAG TIL INNDATA I SFP-BEREGNING I REVISJON AV NS 3031, TILLEGG H

5.2.1 - MÅLTE OG REGISTRERTE LUFTMENGDER

For måling av luftmengder finnes det mer nøyaktige metoder man kan benytte, som for eksempel å bruke sporgass. Siden det ble utført mange målinger ved hver av driftsstillingene, ble det valgt å gå for en metode som ikke var for tidkrevende. Sporgassmåling krever mer utstyr og vesentlig lengre tid å klargjøre målingen. Luftmengdene ble som tidligere nevnt beregnet med formler oppgitt av vifteprodusentene for de spesifikke viftene. Jeg kan ikke med sikkerhet si hvor nøyaktig luftmengdene beregnes ved disse formlene, ettersom at måleusikkerheter ikke var spesifisert.

Driftsstillingene ble på Miljøhuset GK tvangsstyrt ved å benytte kommunikasjonsenhetene CMA, som beskrevet tidligere. Som Figur 23 viser, forholder luftmengdene i de tre driftsstillingene seg konstante gjennom måleperioden. Dette gjorde at måling av luftmengder, effekt og det interne trykkfallet i aggregatet, samt måling av strømningseksponenter ble utført under stabile driftsstillinger. Ettersom at de to delene aggregat 5 og 6 leverer luft til ikke er adskilt, var det relevant

å se nærmere på hvorvidt det var balanse mellom de to aggregatene. Fra kurvene ser man at det er liten forskjell mellom luftmengdene på tilluftssiden gjennom hele måleperioden. Det var ikke mulig å se tilsvarende loggede data for avtrekksluftmengdene.

I Figur 24 kan vi se målte og registrerte luftmengder. Fra Lindinspect ble luftmengdene målt ved alle grenspjeldene i hver etasje. De målte luftmengdene på tilluftssiden er systematisk høyere enn de som er registrert. Dette kan komme av at det kanskje er steder i bygget som får lufttilførsel uten å bli registrert ved grenspjeldene. Måleusikkerhet ved måling av luftmengder som sum av grenspjeldenes luftmengder er høy, og dette kan også spille inn i den store forskjellen. Grunnen til at registrerte luftmengder på avtrekksiden er lavere enn den målte kommer av at den målte luftmengden i tillegg får luftlekkasjen fra renblåsningssektoren. Avtrekksluftmengdene som registreres i Lindinspect trekkes av sentralt i hver av etasjene.

Ved Aibel-bygget og Nydalen Videregående skole, presentert i Figur 25 og Figur 26, er både målte og registrerte luftmengder basert på trykkmåling ved venturi før viftene, og samtlige luftmengder er innenfor måleusikkerhetsområdet. Tilluftsmengdene ved Forskningsparken (Figur 27) er begge basert på summering av luftmengdene ved samtlige grenspjeld. Målt og registrert verdi er nesten like, men som en kan se er måleusikkerhet høy på grunn av at det er målt ved 25 grenspjeld og to kanaler. Avtrekksviftene ved Nydalen VGS er større enn tilluftsviftene, og det kan være en mulig grunn til at luftmengdene over avtrekksviften er større. I Tabell 2 kan en se at de to tilluftsviftene ved Nydalen VGS trekker omtrent like luftmengder, og det samme gjelder for avtrekksviftene. Det er altså ingen vesentlig skjevfordeling selv om aggregatet har parallelle vifter.

Måleusikkerheten for luftmengdene ved Miljøhuset GK, Aibel-bygget og Nydalen VGS ligger rundt 12 %, og de er omtrent like på grunn av at alle er beregnet fra trykkfall over venturi. Ved Forskningsparken er måleusikkerheten på hele 27 %, og det kommer av at hver av målingene ved grenspjeldene har måleusikkerhet i overkant av 5 %. I tillegg kommer måleusikkerhet for beregnet luftmengde for to ventiler som ikke er tilknyttet grenspjeldet.

I beregningene videre er det de målte luftmengdeverdiene som er benyttet for alle byggene.

5.2.2 - RENBLÅSNINGSSEKTOR

Formelen for å beregne luftlekkasjen er benyttet som en indikator for å se nærmere på hvilken størrelsesorden luftlekkasjen utgjør av luftmengdene. Luftlekkasjen gjennom renblåsningssektor utgjorde en prosentandel av tilluftsmengden på mellom 3,6 og 8,2 % (Tabell 3). Differensialtrykket på driftsstilling 2 på Aibel-bygget var i utgangspunktet registrert til å være 0 Pa. Dette må ha vært en

feilnotering under måling, og dermed ble det antatt likt differensialtrykk ved de to driftsstillingene. Denne trykkdifferansen vil ikke endres mye mellom de to driftsstillingene, ettersom at luftmengden på tilluft- og avtrekkssiden øker omtrent likt. Renblåsningssektorens vinkel her kunne ikke måles eller finnes i produktdata, og ble dermed antatt til en vinkel som lå rundt det som ble målt ved de andre byggene. På Miljøhuset GKs driftsstilling 1 er det registrert negativt differensialtrykk. Det er ikke målt negativt differensialtrykk ved de to andre driftsstillingene. Dette kan komme av at det er stor måleusikkerhet i et ventilasjonsaggregat som følge av strømningsforhold og måle metodene som benyttes. En annen mulig forklaring kan være at det har oppstått skjevfordeling av luftmengdene mellom aggregat 5 og 6, hvor for eksempel aggregat 5 kan ha trukket av mer luft enn aggregat 6. Da kan det ha gitt et større undertrykk på tilluftssiden enn avtrekkssiden i aggregat 6. Ved Nydalen VGS ble lekkasjen det dobbelte, ettersom at det er installert to roterende varmevekslere i aggregatet. Ettersom at det er en måleusikkerhet for luftmengdene og differensialtrykket vil prosentandelen kunne avvike noe fra resultatene som er presentert.

5.2.3 - EFFEKTMÅLING

For måling av effekt ble det ved Miljøhuset GK, Nydalen Videregående skole og Forskningsparken benyttet en tre-fase-nettanalysator. Dette gjør at en får mulighet til å måle alle tre fasene i samme øyeblikk i stedet for å måtte utføre tre individuelle målinger. En sikrer da at effekten ikke endrer seg mellom de ulike målingene, og gjør målingen en mer nøyaktig øyeblikkverdi. Ved Aibel-bygget var det ikke mulig å måle effekten for hver av viftene, men dette ble som nevnt løst ved å måle effekten ved inntaket til ventilasjonsaggregatet ved hovedtavla og effekten for styrestrømmen til aggregatet. Det ble i tillegg til tre-fase-nettanalysator benyttet en en-fase-effektanalysator. Det ble altså ikke mulig å se størrelsesorden på effekten for hver av viftene. Dette utgjorde ikke noe problem for videre beregning, ettersom at SFP beregnes med summen av effekten for tillufts- og avtrekksviftene. Grunnen til at måleusikkerheten er noe høyere for Aibel-bygget enn de andre byggene kommer av at det måtte utføres to målinger, og i tillegg har måleinstrumentet Fluke 43 en større usikkerhet enn Chauvin Arnoux CA8334 (se Tabell 4).

5.2.4 - SFP

Ved Forskningsparken ble største luftmengde valgt ved tilluftssiden ettersom at det ikke ble målt luftmengder på avtrekkssiden. For Aibel-bygget og Nydalen VGS viste det seg at avtrekksluftmengdene var de største, mens på Miljøhuset GK var tilluftsmengdene de største. Som man kan se fra Figur 24 - Figur 26 gjør måleusikkerheten at det faktisk kan hende at det er omvendt. Det ble likevel valgt å benytte de målte luftmengdene i beregning av SFP. Luftmengdene for Aibel-

bygget og Nydalen VGS ble da avkastluftmengden minus den beregnede lekkasjen gjennom renblåsningssektoren. De beregnede SFP-verdiene ble da som vist i Tabell 5. Måleusikkerheten her er likevel ganske høy, så disse verdiene kan i realiteten være noe lavere eller høyere.

5.2.5 - REGULERINGSTRYKK

Å finne kritisk vei i anleggene viste seg å være en stor utfordring på grunn av de mange mulige plasseringene. Ideelt sett burde anleggene blitt overstyrt slik at kritisk vei holdt samme plassering. En måte dette kunne vært løst på var å gjøre endringer på romsensorene for å framprovosere en kritisk vei. Dette ble det ikke mulighet for i dette prosjektet. Ved Aibel-bygget visste en plasseringen uavhengig av endringer ved tilluftsentilene, ettersom at den holder et konstant trykk på et bestemt punkt i grenkanalene. Under statisk trykkmåling ville et ideelt tilfelle være å måle med en plugg plassert helt jevnt med en kanalvegg som ikke var bøyd inn på grunn av boreet. Da ville målingen blitt lite påvirket av forstyrrelser. Det var vanskelig i praksis å lage et helt jevnt borehull, og dermed ble målepluggen stikket noe lengre inn i kanalen. Jeg passet på at kanten rundt hullet på pluggen var kuttet rett av og at pluggen ble plassert slik at åpningen sto vinkelrett på strømningsretningen. Dette gjorde at den statiske trykkmålingen i liten grad ble påvirket av dynamisk trykk som følge av luftstrømmen. I Tabell 6 kan vi se at det dynamiske reguleringstrykkfallet utgjør lite i forhold til det statiske. Det utgjør noe mer ved Forskningsparken enn ved Nydalen VGS, og dette kommer av at hastigheten i kanalen etter VAV-spjeldet var høyere på Forskningsparken ved denne ventilen.

Fra Figur 28 kan man se at reguleringstrykket ved Aibel-bygget forholder seg konstant på ca. 49 Pa ved de to driftsstillingene. Da dette anlegget benytter «static pressure reset», vil ikke reguleringstrykket endre posisjon, og dermed er det målte reguleringstrykket det faktiske reguleringstrykket. Ved Forskningsparken ble reguleringstrykket målt til 41 Pa. Her ble det målt ved ganske ugunstige punkter på grunn av liten avstand mellom hvert av påstikkene til ventilene og flere bend. Dette kan ha påvirket målingen av det statiske trykket i kanalen før to-posisjonsspjeldet. Etter grenspjeldet på tilluftssiden ble det målt et totaltrykk på $67,2 \text{ Pa} \pm 9,7 \%$, og reguleringstrykket kan ligge et sted mellom dette og det målte reguleringstrykket. Ved Nydalen VGS var ikke anlegget låst i en posisjon og dermed ble trykk målt ved forhold slik det vanligvis driftes. Det ble tatt stikkprøver ved ulike ventiler, hvor 68,2 Pa var laveste. Reguleringstrykket kan like vel være lavere siden reguleringstrykket endrer posisjon. På Miljøhuset GK ble reguleringstrykket målt til veldig forskjellige verdier, med et spenn mellom 47,7 – 80,6 Pa. Dette kan komme av at stikkprøveventilene det ble målt ved faktisk ikke var langs kritisk vei, eller at overstyringen gav urealistiske reguleringstrykk.

På avtrekkssiden (se Figur 29) ble reguleringstrykket på Nydalen VGS målt høyere enn på tilluftssiden (95,9 Pa). På grunn av mange føringsveier i alle retninger, var det en utfordring å resonnerer seg fram til avtrekkets reguleringstrykk. På grunn av liten avstand mellom etter VAV-spjeld og veggen ved Forskningsparken, ble målepunktet nærmere spjeldet enn hva som var nødvendig avstand. Dette kan ha ført til at det ikke var fullt utviklet strømningsprofil etter målepunktet, som vil kunne påvirke måleresultatet. På Aibel-bygget var det ikke mulig å få målt reguleringstrykket etter avtrekksspjeldet og dermed ble det målt før spjeldet. I driftsstilling 2 ble det bedt om ca. 100 % luftmengde, og da vil spjeldet være i omtrent åpen posisjon. Ved denne driftsstillingen ble det målt en trykkdifferanse på 48,7 Pa, og det vil da ikke være et stort trykkfall over spjeldet. Med andre ord vil reguleringstrykket være på omtrent 50 Pa. Ved driftsstilling 1 ble differensialtrykket målt til 34,3 Pa mellom kanal og rommet. Ettersom at dette er ved en lavere luftmengde, vil spjeldet ha en mer lukket spjeldvinkel enn i driftsstilling 2. Det vil da være et større undertrykk på andre siden av spjeldet, som kan være omtrent i samme størrelsesorden som i driftsstilling 2. Reguleringstrykkene på avtrekkssiden ved Miljøhuset GK varierte, som for tilluftssiden, også med luftmengdene mellom 41,8 – 64,3 Pa. Ettersom at reguleringstrykket skal være omtrent konstant, kan det tyde på at det også her ikke er målt på ventil langs kritisk vei eller at tvangsstyringen gir unødvendig struping.

For å se nærmere på om det var noe som ikke stemte med trykkforholdene under måledagen, ble loggede data av reguleringstrykk studert. Det ble sett på flere ventiler enn de som er presentert i Figur 30. De loggede dataene viste at trykkene endret seg betydelig i de ulike driftsstillingene. I driftsstilling 1 strupte alle spjeld mellom 80 og 90 Pa. Det vil altså si at reguleringstrykket på tilluftssiden var ca. 80 Pa. Videre kan en se at trykkene endres omtrent likt i de tre driftsstillingen i forhold til hverandre. For å kontrollere hvor nøyaktige disse loggede trykkene var, ble de sammenlignet med de målte trykkene ved samme ventil ved samme tidspunkt. Denne sammenligningen, som er presentert i Tabell 7, viser at de fleste reguleringstrykkene ligger innenfor usikkerhetsområdet til målte reguleringstrykk eller i nærheten. De loggede dataene registreres hvert 10. minutt, og trykkene kan ha endret seg noe i løpet av denne perioden. Dette kan forklare hvorfor enkelte av registreringene ikke er innenfor måleusikkerhetsområdet. Lindinvent-ventilens trykkmåling vil også ha en viss måleusikker, men ettersom at de målte og loggede reguleringstrykkene var ganske like, ble det i Figur 31 studert hvor reguleringstrykkene lå i løpet av en tilfeldig ukedag hvor anlegget ikke var tvangsstyrt. Der viste det seg at laveste reguleringstrykk lå ganske konstant i området 40 – 50 Pa. Dette kan tyde på at tvangsstyringen ved bruk av CMA førte til urealistiske reguleringstrykk.

5.2.6 - EKSTERNE TRYKKFALL

Ved Miljøhuset GK stiger eksterstrykket jevnt med økte luftmengder, noe som er forventet. Ved økte lufthastigheter i kanalnettet øker det dynamiske trykkfallet i anlegget. På Aibel-bygget ble eksterstrykkene målt til å være tilnærmet konstant, uavhengig av om luftmengdene økte. Det var kort avstand mellom viftene og målepunktet etter viftene fordi kanalene mellom aggregat og vegg i teknisk rom var kort. Dette gjorde at målingene her ble utført på ugunstige punkter. Ideelt sett skulle det vært lenger avstand fra viftene og fram til målepunktet. Dette kan være med på å forklare hvorfor det ble målt nærmest like eksterne trykkfall. Hvis det hadde latt seg gjøre å måle ved to punkter som hadde større forskjell i samtidighet ville man kanskje sett en tydeligere tendens. For Nydalen Videregående skole og Forskningsparken lar det seg ikke gjøre å se hvordan eksterstrykkene endres med luftmengdene, ettersom at det kun er målt ved en driftsstilling. Disse er likevel nyttig for beregning av dimensjonerende eksterstrykk.

5.2.7 – STRØMNINGSEKSPONENT

Ettersom at det kun ble målt ved én driftsstilling på Nydalen Videregående skole og Forskningsparken, kunne det ikke bestemmes strømningssekspONENT for disse aggregatene. For å gjøre det må det minst måles trykkfall ved to driftsstillinger, og helst fler. StrømningssekspONENTene ble forventet å ligge mellom 1 og 2, men ved Aibel-bygget varierte de for hver komponent fra 0,18 til 3,53 (se Tabell 9). Det var kun varmeveksleren som lå innenfor, med størrelsesorden 1,33. På grunn av at det ikke var uttak for trykkmåling på utsiden av aggregatet, ble en improvisert løsning med små plastrør benyttet som beskrevet i kapittel 2.1.2 - Aibel-bygget. Denne metoden kan være en grunn til de urealistiske resultatene, da det var vanskelig å plassere plastrørene for å sikre god måling. I Tabell 10 kan en se at strømningssekspONENTene for samtlige komponenter ved Miljøhuset GK er innenfor området mellom 1 og 2, med unntak av varmebatteriet. Dette kommer mest sannsynlig av at batteriet er installert etter tilluftsviften, og målepunktet mellom viften og batteriet er svært ugunstig. Her ble det målt trykkfall ved tre driftsstillinger. Dette, i kombinasjon med at det var enkelt å koble seg til trykkuttak på utsiden av aggregatet, gjør at disse resultatene her er mer troverdige enn de som ble målt ved Aibel-bygget.

Ettersom at det kun ble utført måling ved to driftsstillinger ved Aibel-bygget, er det beregnet for tre ulike scenarioer: Målte verdier («Målt»), høyeste verdi av måleusikkerhet på trykkfallet i driftsstilling 1 og laveste for driftsstilling 2 («Målt lav») og laveste verdi i driftsstilling 1 og høyeste i driftsstilling 2 («Målt høy») (Se Tabell 12). Varmebatteriet ble ikke medregnet på grunn av unøyaktige målinger etter tilluftsviften. Ved de målte verdiene for trykkfall ble strømningssekspONENTen på tilluftssiden 1,83, som er nærmere turbulent enn laminær strømning. På avtrekkssiden ble

strømningsekspONENTEN 1,32, som er nærmere laminær. For «Målt lav» ble strømmingen målt til midt mellom laminær og turbulent på tilluftssiden og laminær på avtrekkssiden. StrømningsekspONENTENE ved «Målt høy» er for høy på tilluftssiden, og den er antagelig høyere enn hva som er reelt på avtrekkssiden også. For Miljøhuset GK er strømningsekspONENTENE målt til 1,86 på tilluftssiden, som vil si ganske nær fullt turbulent strømming. På avtrekkssiden ble den beregnet til 1,49. Disse målingene kan også variere på grunn av måleusikkerhet, men gir et bedre bilde av hva strømningsekspONENTEN er, ettersom at det er målt ved tre ulike luftmengder.

På grunn av måleusikkerheten i ventilasjonsaggregat, ble de målte resultatene sammenlignet opp mot simuleringer utført i ventilasjonsprodusentenes egne beregningsprogram. Aggregatene ble simulert med de samme spesifikasjonene som det virkelige aggregatet har, og de simulerte trykkfallene over hver komponent ble benyttet til å beregne strømningsekspONENT. Simulering fra Swegons ProUnit viste at filtrene hadde tilnærmet laminær strømming ($n = 1$). Varmeveksleren hadde strømningsekspONENT på ca. 1,4 på tillufts- og avtrekkssiden. Varmebatteriet har nesten turbulente strømningsforhold, og dette kommer av at batteriet er plassert etter viften. Disse trykkfallene stammer fra simuleringer utført i laboratorium. Trykkfallene som er målt og simulert øker i ulike grad med luftmengdene, og dette fører til ulike strømningsekspONENTER.

Simuleringen for aggregatet ved Miljøhuset GK ble utført i Systemairs programvare SystemairCAD, som baserer seg på målte verdier i laboratorium og oppgitte verdier fra komponentprodusent for enkelte komponenter. Filtrene har en simulert strømningsekspONENT lik 1,30 og 1,23 på henholdsvis tillufts- og avtrekkssiden, som ligger nær laminær strømming. Varmeveksleren gav i simuleringen strømningsforhold på 1,1 på tilluftssiden og 1,1 på avtrekksiden. Her er det varmeveksleren som skiller seg mest fra det som ble målt, hvor den simulerte tilsier at det er omtrent laminær strømming, mens den målte gir en strømningsekspONENT som heller mer mot turbulent strømming. Resultatene fra beregningen av strømningsekspONENTEN for Aibel-bygget som er basert på simulerte trykkfall er vist i Tabell 13. Dette gav strømningsekspONENTER ved Aibel-bygget på 1,25 og 1,23 for henholdsvis tillufts- og avtrekkssiden når ikke varmbatteriet ble med regnet, og 1,31 på tilluftssiden når medregnet batteri. Dette tilsvarer et sted mellom laminær og turbulent strømming, men nærmere laminær. Ved Miljøhuset GK (Tabell 14) heller strømningsekspONENTENE enda mer mot den laminære siden, med 1,16 for tilluftssiden og 1,14 for avtrekkssiden, og når varmbatteriet inkluderes er strømningsekspONENTEN på tilluftssiden 1,27. Disse eksponentene er generelt lavere enn de målte verdiene. Laboratorietester utføres ofte under mer ideelle forhold enn hva det vil være på et bygg. I teknisk rom er det ofte dårlig plass, og dermed vil kanalene som fører inn til aggregatet ha skarpe bend som er med på å forstyrre strømningsbildet. Samtidig er det usikkerheter ved måling av strømningsekspONENTER. Mer realistiske verdier for strømningsekspONENTENE på bygg kan ligge et

sted mellom det som er målt i laboratorium og målt på eksisterende anlegg. StrømningsekspONENTEN som er angitt i Technical Note 65 [35] som en typisk strømningsekspONENT for ventilasjonsaggregat (1,4) vil ligge et stede mellom de målte og simulerte eksponentene. Det foreslås dermed å benytte strømningsekspONENT på 1,4 for å beskrive strømningsforholdene i et aggregat basert på de beregningene som er utført.

5.2.8 - REGULERINGSTRYKK OG DIMENSJONERENDE EKSTERNT TRYKKFALL

For Nydalen VGS og Forskningsparken ble nødvendig dimensjonerende trykkfall beregnet til omtrent 300 Pa. De beregnede eksterne trykkfallene for de aktuelle driftsstillingene ble noe høyere enn det som ble målt (se røde tall i Tabell 18). For driftsstilling 2 og 3 ved Miljøhuset GK stemmer beregnet eksternt trykkfall og trykkoppbygning bra med hva som ble målt. For driftsstilling 1 passet det eksterne trykkfallet bra, men for trykkoppbygningen ble avviket ganske stort. Trykkoppbygningen over avtrekksviften var meget lav (se Tabell 16), og det er årsaken til det store avviket her. Det er altså i modellen forventet at trykkoppbygningen skal være høyere enn hva som ble målt. Som en kan se fra Tabell 16 utgjør trykkoppbygningen over avtrekksviften ca. 40 % av total trykkoppbygning ved driftsstilling 2 og 3, mens for driftstilling utgjør den kun ca. 20 %. Hvis den hadde utgjort 40 % ved driftsstilling 1 også, hadde den totale trykkoppbygningen vært i nærheten av det som er beregnet i modellen. Dimensjonerende eksternt trykkfall ble beregnet til ca. 200 Pa. Omtrent det samme ble beregnet for Aibel-bygget, men her oppsto det en urealistisk fordeling av trykkfall. Modellen tilsa at reguleringstrykket utgjorde like mye som det dimensjonerende eksterne trykkfallet. For å se nærmere på hvorfor dette oppsto, ble reguleringstrykket manuelt satt til å utgjøre 25 % som vist i Tabell 19. Her kan man se at grunnen til at dette skjer er at det eksterne trykkfallet som ble målt forholder seg tilnærmet konstant for de to driftsstillingene, som det ble diskutert i kapittel 5.2.6 - Eksterne trykkfall. For at modellen skal passe, burde det eksterne trykkfallet vært omtrent 50 Pa lavere i driftsstilling 1.

Som en kan se i Figur 36 utgjør kanaltrykket og reguleringstrykket omtrent halvparten av det totale trykkfallet i beregningsmodellen, og aggregatet utgjør den andre halvparten. Dette stemmer godt overens med hva som ble målt i byggene, som er presentert i Tabell 17. Her er det omtrent lik fordeling mellom det interne og eksterne trykkfallet, bortsett fra ved Miljøhuset GK i driftsstilling 1 på grunn av den lave trykkoppbygningen over avtrekksviften. Forskjellen er at reguleringstrykkene utgjør i modellen en større andel i forhold til kanaltrykkfallet enn hva som er målt. Ut fra de målingene som er utført ved de ulike byggene, burde fordelingen se omtrent ut som fordeling for «Aibel-bygget (25%)», som er fra beregningen presentert i Tabell 19. Ved å fastsette inndataverdier

som er mer i tråd med hva som ble målt på byggene vil fordelingen fortsatt bli omtrent likt fordelt mellom trykkfallet i aggregatet og i anlegget (trykkfall i kanal og reguleringstrykk).

Det kan være flere forklaringer på hvorfor dimensjonerende eksterne trykkfall ble forskjellige ved henholdsvis Miljøhuset GK og Aibel-bygget, og Forskningsparken og Nydalen Videregående skole. Ved Aibel-bygget og Miljøhuset GK er kanalene montert som rette strekk ut fra sjaktene, og det er benyttet lik kanaldimensjon hele veien ut. Dette gir lavere trykkfall i kanalnettet, da lavere hastighet gir lavere dynamisk trykkfall. Ved Nydalen Videregående skole og Forskningsparken er det benyttet flere bend og innsnevring av kanaldimensjon utover i anlegget. En annen faktor kan være hvordan luftavkastet er designet. Ved Forskningsparken og Nydalen VGS er trykkfallene på avtrekkssiden høyere enn på tilluftssiden (se Tabell 8). Ved Nydalen VGS ble avkastluften blåst ut gjennom en lem som åpnet seg av lufttrykket, og dette vil være med på å øke trykkfallet. Det foreslås å spesifisere inndata for eksterne trykkfall ut ifra ventilasjonsanleggets utforming. Det foreslås å heve dimensjonerende eksternt trykkfall til 250 Pa for ventilasjonsanlegg med utforming som gir lavt trykkfall. For ventilasjonsanlegg der dette ikke gjøres, eller ikke lar seg utføre, foreslås det et dimensjonerende eksternt trykkfall på 350 Pa. Det bør spesifiseres klare utformingstiltak som skal til for å kunne velge laveste trykkfall i beregningen av SFP.

5.2.9 - TOTAL SYSTEMVIRKNINGSGRAD BASERT PÅ MÅLTE VERDIER

Figur 37 og Figur 38 viser resultatene for beregnet total systemvirkningsgrad for henholdsvis tillufts- og avtrekksviftene ved de ulike byggene og driftsstillingene. Trykkoppbygningen som ble benyttet for beregningen for Aibel-bygget var summen av tillufts- og avtrekksviften. Som nevnt tidligere var måleavstanden her meget kort etter viften, og dette kan forklare at virkningsgraden er over 100 %. Ettersom at dette aggregatet har de minste viftene av byggene som det er målt ved, bør virkningsgraden ligge lavere enn for de andre byggene ettersom at store vifter vil kunne oppnå høyere virkningsgrad enn små vifter. På Miljøhuset GK kan det se ut til at virkningsgraden på tilluftsviften topper rundt 80 % samtidighet, men samtidigheten kan variere noe på grunn av måleusikkerhet for beregnede luftmengder. Det kan se ut til at virkningsgraden faller ved lavere og høyere samtidighet, som er i tråd med det som Figur 22 illustrerer.

For avtrekksviften ble det kun mulig å beregne for Nydalen VGS og Miljøhuset GK, da det manglet luftmengdemåling ved Forskningsparken. Årsaken til at avtrekksviften ved Miljøhuset GK viser lavere virkningsgrad enn tilluftsviften, kommer av at målt luftmengde og trykkoppbygning er god del lavere enn effekten ved den samme samtidigheten. Måling av trykkoppbygningen medførte måling under forhold der det ikke var fullt utviklet strømningsprofil. Dette kommer klarere fram når man ser på

virkningsgraden med laveste samtidigheten, hvor virkningsgraden er veldig lav. Dette kommer av at det er målt en vesentlig lavere trykkoppbygning ved denne driftsstillingen i forhold til de andre driftsstillingene. Man kan se fra Tabell 20 - Tabell 23 at virkningsgradene som beregnes avviker i ulik grad fra hva som er beregnet fra målte verdier. Dette kan komme av at konstanten k er satt lik 5 og at dimensjonerende SFP, som er hentet fra mottatt dokumentasjon i form av aggregatsimuleringer, ikke nødvendigvis er det som er tilfellet for det virkelige anlegget. Det bør spesifiseres konstanter for definerte aggregatstørrelser, slik at det tas hensyn til viftestørrelsen når virkningsgraden beregnes. Det er ikke satt som mål i dette prosjektet å definere områder for ulike konstanter, men dette bør sees nærmere på.

5.2.10 – SAMMENLIGNING MELLOM MÅLT OG BEREGNET SFP

I beregningen av SFP i NS 3031 bør resultatene være noe mer konservative enn hva en vil oppnå i virkeligheten, for å forsikre seg om at energiberegningen ikke gir et lavere energibehov enn hva det i realiteten vil ha. På denne måten kan det oppfordres til å utføre dokumentasjon av de faktiske ytelsene i de tilfellene man mener et anlegg er bedre enn hva beregningene tilsier.

Fra Figur 39 Figur 40 kan vi se SFP-verdiene som er beregnet fra de målte variablene og de som er beregnet i henhold til utkastet til ny revisjon av NS 3031, Tillegg H. Alle de spesifikke vifteeffektene som er beregnet, med unntak av Nydalen VGS, er innenfor måleusikkerhetsområdet til de målte SFP-verdiene. Ved Nydalen VGS var den beregnede SFP-verdien noe lavere enn hva som ble målt. På grunn av måleusikkerheten for luftmengden er en mulig forklaring at samtidigheten som er benyttet er lavere eller høyere enn den det ble målt ved. Måleusikkerheten for variablene for beregning av reguleringstrykk og dimensjonerende eksterne trykkfall kan også ha spilt inn. Ettersom at det i dette prosjektet ikke ble tatt stilling til hva konstanten k skulle settes til, ble den for alle byggene satt lik 5. Dette er hva utkastet til Tillegg H spesifiserer at man skal benytte, dersom ikke annet er målt eller beregnet for det aktuelle aggregatet. Denne konstanten vil, i følge utkastet, variere med blant annet aggregatets størrelse. Ventilasjonsaggregatene det er målt ved har et stort spenn (fra 6 500 – 50 000 m³/h), og dette kan også spille inn i hvor godt tilpasset beregningsmodellen er til det enkelte anlegget.

Verdiene som foreslås for beregning av SFP baseres på målingene som er utført ved de fire utvalgte byggene. Det kan ikke gis spesifiserte verdier for de ulike styresystemene på dette grunnlaget, ettersom at det kun er målt ved ett bygg for hvert av systemene. Ytelser ved bygg vil i stor grad være påvirket av anleggets utførelse, og vil dermed kunne variere mellom ulike bygg som benytter samme styreprinsipp. Det oppfordres dermed til videre innhenting av ytelser ved eksisterende anlegg.

5.3 - KONKLUSJON

Følgende parametere foreslås for enkel beregningsmodell for valg av energioptimale ventilasjonsløsninger:

- Oppvarming og kjøling av tilluft.
- Varmegjenvinning fra avtrekksluft.
- Bygningskategori for bestemmelse av samtidighet og tilstedeværelse.
- Type behovsstyringssystem for bestemmelse av trykkforhold og luftmengdereduksjon.
- Systemeffekt.
- Årsgjennomsnittlig spesifikk vifteeffekt.
- LCC-analyse for sammenligning av alternative løsninger.

For revisjon av NS 3031, Tillegg H, foreslås følgende inndata basert på utførte målinger ved fire bygg:

- Reguleringsstrykk ved behovsstyring av luftmengdetilførsel: 100 Pa.
- Dimensjonerende eksternt trykkfall på enten tilluft- eller avtrekksside:
 - Kanalsystem med utforming som er med på å gi lavt trykkfall: 250 Pa
 - Kanalsystem hvor det av praktiske hensyn ikke kan garanteres slik utforming: 350 Pa.
- StrømningsekspONENT i ventilasjonsaggregat: 1,4

5.4 - ANBEFALING TIL VIDERE ARBEID

Det oppfordres til å innhente dokumentasjon fra andre behovsstyrte bygg, for å finne ut om de verdiene som her er foreslått som inndata til SFP-beregning også passer for disse. Det bør også utføres målinger ved flere bygg med de ulike styringsprinsippene, for å se om verdier avviker for verdier målt for tilsvarende styresystemer i dette prosjektet. Det kan også sees nærmere på om det kan være andre framgangsmåter for å lokalisere ventilen langs kritisk vei i et behovsstyrt ventilasjonssystem. Andre løsninger for overstyring av ventilasjonsanlegget, for å få fram ulike driftsstillinger, bør også vurderes. Videre bør sees nærmere på hva slags konstant som bør benyttes for ulike aggregatstørrelser i beregning av viftesystemets totale virkningsgrad.

Varme- og kjølebatteriers pumper vil kunne variere for ulike styresystemer, og dette bør det gjøres forsøk på. Hvor mye energibehov til batterienes pumper vil variere må sees i sammenheng med hvor mye luftmengdene kan reduseres for ulike ventilasjonstekniske styresystem, valg av pumpemotorer og reguleringsstrategi. Forsøk hvor det måles ved ulike styresystem med identiske utgangspunkt bør utføres, for å finne ut hvor godt systemene behovsstyrer ved å benytte ulike typer sensorer.

6 – REFERANSER

1. *Manual CA8334, Code 68914D01 - Ed 1*, 2003.
2. *Fluke 43 User Manual*, 2001.
3. *Operating Instructions, ATEX – Plug fans*. 05.03.2013; Available from: www.nicotra-gebhardt.com.
4. Mysen, M., et al., *Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in Norwegian primary schools*. Energy and Buildings. 0378-7788, 2005. **37**(12): p. 1234-1240.
5. *Utkast til revisjon av NS 3031, Tillegg H*.
6. van Haperen, K., Berg, Gunnar, Folkesson, Kjell, Verhoeven, Gerne, Professor Haibel, Michael, *EUROVENT 6/8: Recommendations for calculations of energy consumption for air handling units*, 2005, EUROVENT.
7. *Stortingsmelding 21, Norsk klimapolitikk, 7 Bygg og fjernvarme*. . Available from: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/md/dok/regpubl/stmeld/2011-2012/meld-st-21-2011-2012/7.html?id=682962>.
8. Raatschen, W., *Demand Controlled Ventilating System: State of the Art Review*. ISBN 91-540-5169-X. 1990, International Energy Agency, Annex 18, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden.
9. Månsson, L.-G., *Demand Controlled Ventilating Systems: Case Studies*. ISBN 91-540-5511-3. 1992, International Energy Agency, Annex 18, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program. Swedish Council for Building Research, Stockholm Sweden.
10. Lars-Göran Månsson, S.A.S., *Demand Controlled Ventilating Systems: Source Book*. ISBN 91-540-5513-X. 1992, International Energy Agency, Annex 18, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program. Swedish Council for Building Research, Stockholm Sweden.
11. Cathrine Grini, T.W., *LECO: Behovstilpasset ventilasjon, Hvordan får man alle brikkene på plass*. 1504-6958, 2011: SINTEF akademisk forlag.
12. *Miljøhuset GK, Oslo*. 13.03.2013; Available from: <http://www.enova.no/innsikt/historier/forbildebygg/kontorbygg/miljohuset-gk/417/1292/>.
13. Johansen, B.S., *Muntlig framstilling*.
14. *gk.no, Husbloggen*. 14.02.2013; Available from: <http://miljohuset-gk.no/husbloggen/>.
15. *Lindinvent.se, Miljøhuset GK*. 12.03.2013; Available from: http://www.lindinvent.se/referenser/?tx_dfgooglemaps_pi%5Bshowdetails%5D=1&tx_dfgooglemaps_pi%5Bpoi%5D=145.
16. *Lindinvent.se, Behovsstyrt ventilasjon - hur funkar det?* 12.03.2013; Available from: <http://www.lindinvent.se/info/behovsstyrd-ventilation/>.
17. *Lindinvent.se, Elinstallsjon*. 12.03.2013; Available from: http://www.lindinvent.se/fileadmin/user_upload/produkter/allmänna_produktiler/EL_PROJ11.pdf.

18. *Lindinvent.se, Tilluftsdon*. 14.02.2013; Available from: http://www.lindinvent.se/fileadmin/user_upload/produkter/tilluftsdon/TTD/TTD_PB11D_44_web.pdf.
19. *Lindinvent.se, Brukergrensesnitt*. 14.02.2013; Available from: http://www.lindinvent.se/fileadmin/user_upload/produkter/anvandargransnitt/CMA/CMA_PB_04_37_web.pdf.
20. *Mail fra Lindinvent v/Lars-Johan Hjertz ang. CMA*.
21. 14.02.2013; Available from: www.aibel.com.
22. *tu.no, Realfagsinteressen må vekkes tidlig*. 14.02.2013; Available from: <http://www.tu.no/bygg/2012/02/29/-real-fagsinteressen-ma-vekkes-tidlig>.
23. *tu.no, Her er de nominerte til årets bygg*. 14.02.2013; Available from: <http://www.tu.no/bygg/2012/03/20/her-er-de-nominerte-til-arets-bygg>.
24. *FDVweb - FDV-dokumentasjon, Aibel-bygget*.
25. *Brosjyre: ADAPT Don*. 06.03.2013; Available from: www.swegon.com/no
26. *Brosjyre: Systemteknik*. 06.03.2013; Available from: www.swegon.com/no.
27. *Joelson, T. Nydalen Videregående skole*. 25.02.2013; Available from: <http://www.bygg.no/prosjekter/nydalen-videregaaende-skole?showImage=3>.
28. *FDVweb, FDV-dokumentasjon, Luftbehandling, Nydalen Videregående skole*. 20.02.2013.
29. *FDVweb, FDV-dokumentasjon, Systeminformasjon, Nydalen Videregående skole*. 20.02.2013.
30. *FDVweb, FDV-dokumentasjon, Trox Auranor VAV-regulator*. 20.02.2013.
31. *Forskningsparken.no*. 03.03.2013; Available from: <http://forskningsparken.no/Produkter-og-tjenester/Hus-5/>.
32. *saasprosjekt.no*. 04.03.2013; Available from: <http://www.saasprosjekt.no/fileadmin/Datablader/KAL/CVAV.pdf>.
33. *Per Johansson, A.S., Metoder för mätning av luftflöden i ventilationsinstallationer*. ISBN 91-540-5827-9. 1998, NVG, Nordiska Ventilationsgruppen byggforskningsrådet.
34. *TT570 Standard Operating Manual*. 07.02.2013; Available from: <http://www.ttseries.com/digital-instruments/tt570-standard-operating-manual.pdf>.
35. *Schild, P.G., Mysen, M., Recommendations on Specific Fan Power and Fan System Efficiency*. ISBN 2-930471-30-1. Technical Note AIVC 65. 2009, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme.
36. *Tavoularis, S., Measurement in Fluid Mechanics*. ISBN 0-521-81518-5. 2005, Cambridge University Press.
37. *Yunus A. Cengel, J.M.C., Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, Second Edition*. ISBN 978-007-128421-9. 2010: The McGraw-Hill Companies.
38. *Petersen, A.J., Bryn, Ida H., Schild, Peter G., Haugen, Elisabeth N., Nilson, Gertrud, Høydahl, Kjell, Forhold tilknyttet bruk av roterende gjenvinnere i skoler*, 2009: Erichsen & Horgan AS.
39. *Swema 3000 Manual*. 19.03.2013; Available from: http://www.swema.com/Prod_docs/Swema%203000%20manual%205.21_eng.pdf.
40. *Måleavvik ved ulike målemetoder fra flere forsøk*, SINTEF Byggforsk.

41. *Matematikk.org - Standardavvik*. 20.02.2013; Available from: <http://www.matematikk.org/artikkel.html?tid=68746>.
42. Wildi, T.W., *Eletrical Machines, Drives and Power Systems*. 2006, ISBN 0-013-196918-8.
43. Halbo, L., *Kvalitetsstyring og måleteknikk*, ed. utgave. 2006, ISBN 978-82-05-40211-9.
44. *Telefonsamtale, Swegon v/Robin Thune Larsen*.
45. *Mail: Systemair v/Øystein Amdal*.
46. *Luftmengdeberegning/k-faktor, Swegon*.
47. *K-faktor: High-performance centrifugal fans*, Ziehl-Abegg, Editor 2011.
48. *Brosjyre: Trox Teknik - Auranor, Innjusteringsguide*. 2007 Mars, 2013; Available from: http://www.trox.no/xpool/download/no/auranor/technical_documents/atd_mix_air_diff/manuals/guide_07.pdf.
49. Norge, S., *NS 3454: Livssykluskostnader for byggverk: Prinsipper og struktur, 2. utgave*, 2000.
50. Novakovic, V., Hanssen, Sten Olaf, Thue, Jan Vincent, Wangensteen, Ivar, Gjerstad, Frode Olav, *ENØK I BYGNINGER: Effektiv energibruk*. ISBN 978-82-05-37496-6, ed. U. 3. 2007: Gyldendal Undervisning.
51. *BELOK LCC*. 04.04.2013; Available from: <http://www.belok.se/lcc.php>.
52. Halvarsson, J., *Occupancy pattern in office buildings: consequences for HVAC system design and operation*, 2012, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet: Trondheim. p. 1 b. (flere pag.) : ill.
53. Tor Helge Dokka, M.K., Matthias Haase, Mads Mysen, *Kriterier for passivhus- og lavenergibygg - Yrkesbygg*. Prosjektrapport 42, 2009. **1504-6958**.
54. Lu, T., X. Lü, and M. Viljanen, *A novel and dynamic demand-controlled ventilation strategy for CO2 control and energy saving in buildings*. *Energy and Buildings*, 2011. **43**(9): p. 2499-2508.
55. Garg, V. and N.K. Bansal, *Smart occupancy sensors to reduce energy consumption*. *Energy and Buildings*, 2000. **32**(1): p. 81-87.
56. Norge, S., *NS 3031:2007, Beregning av bygningers energiytelse: Metode og data*, 2007.
57. Gary Benson, F.B., Don Casada, Brad Gustafson, Tom Gustafson, Tony Quinn, Paul Saxon, Bill Smiley, Sastry Varanasi, Dick Williamson, Ron Wroblewski, *Improving Fan System Performance: A sourcebook for industry*. 2003: U.S. Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy og Air Movement and Control Association International, Inc.
58. Standard, I., *ISO 12759: Fans - Efficiency classification for fans*, 2010.
59. Air Movement and Control Association International, I., *ANSI/AMCA Standard 205-12, Energy Efficiency Classification for Fans*, 2012: Air Movement and Control Association International, Inc.
60. Duggan, M., *New fan standard for energy efficiency*. *ISO Focus*, 2009(October): p. 40 - 41.
61. Stevens, M., *Fan Performance*. Air Movement and Control Association International, Inc., (Paper I.D. 021).
62. *AMCA Publication 201-02: Fans and Systems*, 2011, Air Movement and Control Association International, Inc.
63. *Skjermdump fra Lindinvents oversiktsprogram Lindinspect ved Miljøhuset GK*.

64. *Lovdata.no: § 14-3. Energitiltak c).* [cited 2013 18/5]; Available from: <http://www.lovdata.no/for/sf/kr/tr-20100326-0489-034.html>.
65. *Byggteknisk forskrift: IV. Lyd og vibrasjoner* [cited 2013 14/5]; Available from: <http://www.lovdata.no/for/sf/kr/tr-20100326-0489-028.html#13-9>.