

Masteroppgave

Juni, 2019

Masteroppgave

Katrine Merkesdal Hall

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige
universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for energi- og prosesseteknikk

Katrine Merkesdal Hall

Evaluering av ventilasjonsløsninger for termisk komfort og inneluftkvalitet i en klatrehall

Juni 2019





Kunnskap for en bedre verden

Evaluering av ventilasjonsløsninger for termisk komfort og inneluftkvalitet i en klatrehall

Katrine Merkesdal Hall

Energi og miljø

Innlevert: Juni 2019

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi - og prosessteknikk

Forord

Denne oppgaven utgjør det avsluttende arbeidet med min mastergrad i Energi og miljø hos Institutt for energi- og prosessteknikk (EPT) ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU. Tema for oppgaven er ventilering av et innendørs klatreanlegg for oppnåelse av et sunt og behagelig innemiljø, i en bygning med strenge krav til energibruk. Arbeidet er utført under veiledning av professor Hans Martin Mathisen ved NTNU-EPT, og medveileder Gro Wormdal fra Caverion. Masteroppgaven er en fortsettelse på arbeid utført i forbindelse med mitt fordypningsprosjekt høsten 2018. Tema og problemstillinger både for fordypningsprosjektet og denne masteroppgaven ble foreslått av Caverion.

Jeg ønsker å rette en stor takk til Hans Martin Mathisen, som har bidratt med innspill og verdifull kunnskap, og har vært en viktig støttespiller i arbeidet med denne oppgaven. En stor takk også til Gro Wormdal, for gode ideer og konstruktive tilbakemeldinger underveis. Videre ønsker jeg å takke Arve Stavø ved Trondheim Klatresenter og Thomas Simonsen i Studentsamskipnaden i Gjøvik, Ålesund og Trondheim (Sit), som har muliggjort undersøkelser av luftkvalitet i eksisterende klatreanlegg i Trondheim.

En spesiell takk til Espen Aronsveen for oppmuntring, tålmodighet og korrekturlesing, og til gode venner i Trondheim som har gjort årene på NTNU uforglemmelige.

Illustrasjonen på oppgavens forside er av den planlagte undervisnings- og idrettsbygningen i Elgesetergate 10 i Trondheim, og er benyttet med tillatelse fra LINK arkitektur.



Katrine Merkesdal Hall

Trondheim, 5. juni 2019

Sammendrag

I omleggingen til lavutslippssamfunnet er energieffektivisering av bygningsmassen, som i dag står for rundt 40 % av Norges samlede energibruk, av stor betydning. Et økende fokus på minimering av energibruk til bygningers tekniske installasjoner må likevel ikke gå på bekostning av et tilfredsstillende inneklima. Det er derfor behov for energieffektive systemer for ventilering, oppvarming og kjøling av bygg, slik at helse, trivsel og produktivitet fremmes samtidig som energibruk reduseres.

Tema for denne oppgaven er ventilering av en innendørs klatrehall i et planlagt undervisnings- og idrettsbygg i Elgesetergate 10 i Trondheim. Formålet har vært å kartlegge mulige utfordringer relatert til inneluftkvalitet og termisk komfort i det aktuelle rommet, samt å anbefale en ventilasjonsløsning som er egnet til å håndtere de identifiserte utfordringene.

I arbeidet med å besvare oppgavens problemstillinger har det blitt gjennomført målinger av lufttemperatur, CO₂-nivå, relativ luftfuktighet og konsentrasjon av svevestøv i to eksisterende klatreanlegg i Trondheim; Trondheim Klatresenter på Leangen og klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Det var forventet å finne forhøyede konsentrasjoner av svevestøv i klatreanleggene, ettersom det i forbindelse med klatreaktivitet hyppig benyttes såkalt "klatrekalk", magnesiumkarbonat i pulverform, som fører til støvproduksjon. I klatrehallen på Dragvoll er det også gjennomført en spørreundersøkelse for kartlegging av det opplevde inneklimaet i lokalet, med hensyn både på termisk miljø og ubehag relatert til svevestøv. Videre er det utarbeidet en modell av den planlagte klatrehallen i Elgesetergate 10 i bygningssimuleringsprogrammet SIMIEN, for beregning av forventet varme- og kjølebehov og av forventet energibruk til ulike energiposter.

Luftmålingene i Trondheim Klatresenter viste et høyt CO₂-nivå gjennom hele driftstiden, og en kraftig økning i svevestøvkonsentrasjon i forbindelse med ventilasjonsanleggets overgang fra nattmodus til vanlig driftsmodus. Det ble videre funnet at støv fra bruk av klatrekalk i hovedsak består av støvpartikler i de minste størrelsesfraksjonene. I klatrehallen på Dragvoll ble det registrert lavere CO₂-nivå, og lavere maksimumsverdier for svevestøv. Analyse av resultatene fra spørreundersøkelsen og temperaturmålingene på Dragvoll indikerer at personer som oppholder seg i klatrehallen i stor grad vil være fornøyde med det termiske miljøet ved en lufttemperatur på rundt 18,0 °C. Simuleringene av energibehov for den planlagte klatrehallen viste at i løpet av et år forventes oppvarmingsbehovet å dominere, men at det samtidig vil være krevende å holde lufttemperaturen på et akseptabelt nivå i de varmeste månedene.

Enhver ventilasjonsløsning vil ha både fordeler og ulemper. I evalueringen av mulige alternativer for ventilering av den planlagte klatrehallen er ventilasjonsanleggets evne til å fjerne helseskadelige støvpartikler fra oppholdssonen, samt opprettholde en lav romlufttemperatur i perioder med kjølebehov, vurdert å være avgjørende. Basert på analyse av resultatene, i tillegg til ventilasjonsteknisk teori, er det konkludert med at et behovsstyrt system basert på fortrengningsventilasjon med tilluftstilførsel ovenfra vil være best egnet til å håndtere utfordringene relatert til inneluftkvalitet og termisk komfort i klatrehallen i Elgesetergate 10. Et slikt system forventes å være i stand til effektivt å fjerne helseskadelige støvpartikler i tillegg til å holde lufttemperaturen på et lavt nivå, samtidig som kravet til minimering av energibruk oppfylles.

Abstract

Energy efficient buildings are of considerable importance in the transition to a low-emission society, as buildings represent around 40 % of the total energy use in Norway. Yet with an increased focus towards minimizing energy use in technical building installations, a satisfactory indoor climate must not be compromised. Thus, there is need for energy efficient systems for ventilation, heating and cooling of buildings, in order to promote health, wellbeing and productivity, while at the same time reducing energy consumption.

The topic of this thesis is ventilation of an indoor climbing facility in a combined building for education and sports, currently in the planning stage, in Elgesetergate 10 in Trondheim, Norway. The purpose has been to identify possible challenges related to indoor air quality and thermal comfort in the room in question, as well as recommending a solution for ventilation of the room suited to handling these challenges.

Measurements of air temperature, CO₂-levels, relative humidity and concentrations of airborne particles have been carried out in two existing climbing facilities in Trondheim; Trondheim Klatresenter and the climbing hall at Dragvoll sports center. Elevated levels of airborne particles in the facilities were expected, as so-called "gym chalk", pulverized magnesium carbonate, is used frequently by climbers, leading to the production of dust particles. In the climbing hall at Dragvoll a survey has been carried out concerning the perceived indoor climate, with regards to indoor air quality and thermal comfort. Lastly, a model of the planned climbing hall in Elgesetergate 10 has been constructed in the computational building simulation tool SIMIEN, in order to estimate the expected heating- and cooling demand as well as the expected energy demand of different energy posts.

The measurements carried out in Trondheim Klatresenter showed elevated levels of CO₂ throughout the opening hours, and a severe increase in the concentration of airborne particles related to the ventilation system switching from night mode to normal operating mode. It was found that dust originating in the use of gym chalk largely consists of fine particles in the smallest size fractions. In the climbing hall at Dragvoll, low levels of CO₂ and a low maximum value of particle concentrations were registered. An analysis of the results of the survey, as well as the temperature measurements from Dragvoll, indicate that a high degree of satisfaction with the thermal environment in indoor climbing facilities will be obtained for an air temperature of around 18,0 °C. Simulations of energy demand for the planned climbing hall showed that heating demand is expected to dominate during the year, but at the same time maintaining a low air temperature during the warm months is expected to be challenging.

Any ventilation system will have its benefits and drawbacks. In evaluating possible options for the ventilation of the planned climbing hall, the ability of the ventilation system to remove harmful dust particles while maintaining a low air temperature is considered a determining factor. Based on an analysis of the obtained results, as well as theoretical ventilation principles, it is concluded that a demand controlled system based on displacement ventilation with air supply from above is best suited to ensure indoor air quality and thermal comfort in the climbing hall in Elgesetergate 10. Such a system is expected to be capable of efficiently removing harmful particles and maintaining a low air temperature while simultaneously meeting demands regarding low energy consumption.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Figurer	viii
Tabeller	xii
Ligninger	xiv
Forkortelser	xv
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstillinger og metodikk	3
1.3 Avgrensing	3
1.4 Rapportens struktur	4
2 Teoretisk bakgrunn	7
2.1 Inneklima i bygninger	7
2.1.1 Inneklima-begrepet og sentrale indikatorer	7
2.1.2 Fuktig luft	9
2.1.3 Luftkvalitet i innendørs klatreanlegg	10
2.2 Ventilasjonsprinsipper	12
2.2.1 Generelt om ventilasjonsanlegget	12
2.2.2 Fortrengningsventilasjon	14
2.2.3 Omrøringsventilasjon	18
2.2.4 Stempelstrømventilasjon	19
2.3 Ventilasjonseffektivitet	20
2.4 Luftbevegelser i ventilerte rom	23
2.5 Behovsstyring av ventilasjonssystemet	25
2.5.1 DCV-systemer - bakgrunn og regulering	25
2.5.2 Samtidighet	27
3 Krav og belastninger i klatrehallen i Elgesetergate 10	29
3.1 Byggteknisk forskrift (TEK17)	29
3.1.1 Kapittel 13 - Inneklima og helse	30
3.1.2 Kapittel 14 - Energi	30
3.2 Passivhusstandarden (NS 3701)	31

3.3	Føringer og krav fra offentlige instanser	32
3.3.1	Folkehelseinstituttets inneklimanormer	32
3.3.2	Arbeidstilsynet: Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen	33
3.3.3	Veiledere fra Kulturdepartementet	33
3.4	Building Research Establishment's Environmental Assessment Method (BREEAM)	34
3.4.1	BREEAM-NOR Teknisk manual - 2012	35
3.4.2	BREEAM-NOR Teknisk manual - 2016	35
3.5	Zero Emission Building (ZEB)	36
3.6	Kravspesifikasjon fra Statsbygg	37
3.7	Oppsummering av viktige krav	38
3.8	Personbelastning	38
4	Målinger og spørreundersøkelse	41
4.1	Målinger av luftkvalitet i Trondheim Klatresenter	41
4.1.1	Beskrivelse av ventilasjonsanlegget i Trondheim Klatresenter	41
4.1.2	Måleutstyr benyttet i Trondheim Klatresenter	43
4.1.3	Utførelse av luftmålinger i Trondheim Klatresenter	44
4.2	Målinger av luftkvalitet på Dragvoll idrettssenter	48
4.2.1	Beskrivelse av ventilasjonsanlegget i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter	48
4.2.2	Måleutstyr benyttet på Dragvoll idrettssenter	50
4.2.3	Utførelse av luftmålinger på Dragvoll idrettssenter	50
4.3	Spørreundersøkelse blant klatrere på Dragvoll idrettssenter	52
5	Beregning av forventet varme- og kjølebehov	53
5.1	Utforming og plassering av klatrehallen i Elgesetergate 10	53
5.1.1	Horisont mot vest og nord	55
5.2	Bruksmønster	56
5.2.1	Driftstider	56
5.2.2	Internlaster	57
5.3	Ventilasjon og oppvarming	57
5.4	Simuleringer	59
6	Resultater	61
6.1	Inneluftkvalitet og termisk miljø i Trondheim Klatresenter	61
6.1.1	Målinger av lufttemperatur i Trondheim Klatresenter	61
6.1.2	Målinger av CO ₂ -nivå, lufttemperatur og relativ luftfuktighet i Trondheim Klatresenter	67
6.1.3	Målte konsentrasjoner av svevestøv i Trondheim Klatresenter	69
6.1.4	Evaluering av fremgangsmåte for luftmålinger i Trondheim Klatresenter	72
6.2	Inneluftkvalitet og termisk miljø i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter	74
6.2.1	Målinger av CO ₂ -nivå, lufttemperatur og relativ luftfuktighet på Dragvoll idrettssenter	74

6.2.2	Målte konsentrasjoner av svevestøv på Dragvoll idrettssenter	76
6.2.3	Evaluering av fremgangsmåte for luftmålinger på Dragvoll idrettssenter	80
6.2.4	Resultater av spørreundersøkelse om termisk komfort og luftkvalitet	80
6.2.5	Evaluering av fremgangsmåte for spørreundersøkelse	83
6.3	Energibehov for klatrehallen i Elgesetergate 10 beregnet i SIMIEN	83
6.4	Usikkerhet og feilkilder i beregning av forventet varme- og kjølebehov for klatrehallen i Elgesetergate 10	87
7	Diskusjon	89
7.1	Termisk komfort i innendørs klatreanlegg	89
7.1.1	Observert termisk miljø i undersøkte lokaler	90
7.1.2	Ventilasjonsløsning for termisk komfort i klatrehallen i Elgesetergate 10	92
7.2	Trygg og behagelig luftkvalitet i innendørs klatreanlegg	95
7.2.1	Håndtering av støv fra klatrekalk	95
7.2.2	CO ₂ -nivå i undersøkte lokaler	97
7.2.3	Ventilasjonsløsning for inneluftkvalitet i klatrehallen i Elgesetergate 10	98
8	Konklusjon	103
9	Videre arbeid	105
	Bibliografi	106
A	Forberedelser til luftmålinger	111
A.1	Beregning av korreksjonsfaktor for <i>Maxim iButtons</i>	111
A.2	Testing av <i>Chauvin Arnoux 1510 ambient air tester</i>	112
B	Tillegg til resultater av luftmålinger	121
C	Spørreundersøkelse gjennomført i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter	127
D	Inndata til SIMIEN-modell	131
D.1	Prosjektdata	131
D.2	Sone: Klatrehall	131
D.2.1	Fasader og skillekonstruksjoner	131
D.2.2	Ventilasjon (VAV)	133
D.2.3	Internlaster	134
E	Vedlegg relatert til luftmålinger utført av Buch og Jensås	137
F	Risikoanalyse gjennomført i forkant av luftmålingene i Trondheim Klatresenter	139

Figurer

1.1	Klatrehallen (markert i rødt) i første underetasje, første etasje og andre etasje på det nordvestlige hjørnet av Elgesetergate 10. Bildet er et skjermbilde fra 3D-modellen utarbeidet i byggeprosjektets tidligfase.	2
2.1	Grafisk illustrasjon av bruken av begrepene friskluft, tilluft, avtrekksluft og avkastluft.	13
2.2	Prinsippet bak fortreningsventilasjon. Figur utarbeidet med inspirasjon fra Nilsson et al. (2003).	14
2.3	Illustrasjon av prinsippet med fortreningsventilasjon. Luft tilføres ved gulvet, stiger når det kommer i kontakt med varmekilder, og trekkes ut nært himlingen. Figuren er gjengitt med tillatelse fra Hans Martin Mathisen.	15
2.4	Illustrasjon av prinsippet bak fortreningsventilasjon med tilluftstilførsel ovenfra. Figuren er utarbeidet etter inspirasjon fra Karimipanah et al. (2000)).	16
2.5	Vertikal temperaturfordeling ved fortreningsventilasjon for et rom med normal takhøyde (figur 2.5a) og for et rom med stor takhøyde (figur 2.5b). Figurene er utarbeidet med inspirasjon fra Skistad et al. (2002).	17
2.6	Konveksjon oppover langs en varm vegg, og nedover langs en kald vegg (kaldras). Figuren er utarbeidet med inspirasjon fra Skistad et al. (2002).	18
2.7	Prinsippet bak omrøringsventilasjon. Luft tilføres rommet med høy nok hastighet til at den setter romluften i bevegelse. Avtrekksluften har samme sammensetning som romluften. Figur utarbeidet med inspirasjon fra Nilsson et al. (2003).	19
2.8	Illustrasjon av prinsippet bak stempelstrømventilasjon. Luft tilføres ved høy hastighet gjennom en stor overflate, og "rensker" romluften. Figur utarbeidet med inspirasjon fra Nilsson et al. (2003).	20
2.9	Illustrasjon av konseptet bak begrepet luftens alder. Hvert luftmolekyl i punkt P har tilbragt ulik mengde tid i rommet, og er i ulik grad forurenset av romluften. Luftens alder ved avtrekket er lik den nominelle tidskonstanten, τ_n . Illustrasjonen er utarbeidet med inspirasjon fra Mundt et al. (2004).	21
2.10	Illustrasjon av en fristråle (figur 2.10a) og en veggstråle (figur 2.10b). Illustrasjonene er utarbeidet med inspirasjon fra Sørensen (1996).	23
2.11	Illustrasjon av Coanda-effekten på en luftstråle tilført nært himlingen. Effekten fører til at luften kleber seg til himlingen, og luftstrålens kastelengde forlenges med $\sqrt{2}$ sammenlignet med uten Coanda-effekten. Utarbeidet med inspirasjon fra Sørensen (1996).	24
2.12	Blokkdiagram for en tilbakekoblet reguleringsløyfe. Figuren er utarbeidet med inspirasjon fra Balchen et al. (2003).	26

3.1	Grafisk illustrasjon av ZEB-definisjonen. Bygningens produksjon av fornybar energi (grønn sirkel) veier opp for utslipp av drivhusgasser i de ulike fasene av bygningens levetid. Figuren er gjengitt med tillatelse fra The Research Centre on Zero Emission Buildings.	36
4.1	Tillufts- og avtrekksventilene i ventilasjonsanlegget i Trondheim Klatresenter. Bildene er tatt 21. februar 2019 i forbindelse med luftmålinger i lokalet.	42
4.2	Ventiler for avkast og inntak av luft til ventilasjonsaggregatet i Trondheim Klatresenter. Avkast er plassert til venstre; inntaksrist til høyre. Foto: Jørgen Tonning Buch.	43
4.3	Plassering av <i>C.A 1510</i> -målerne CA1, CA2, CA4, CA5 og CA6 i lokalet til Trondheim Klatresenter. Måleren CA3 var plassert ved anleggets sentrale avtrekk utenfor tegningen. Hver målers plassering er markert med blå skrift.	47
4.4	Plasseringen av måleren CA5 (merket med gult), i en av lokalets "grotter". Blå markering viser de nærmeste tilluftsventilene. Bildet er tatt 21. februar i forbindelse med luftmålinger i lokalet.	47
4.5	Tilluft tilføres klatrehallen på Dragvoll idrettssenter gjennom en kanalventil plassert i et lagerrom under trappen ned til planet hvor klatrehallen er plassert. Figurene 4.5a og 4.5b viser ventilen henholdsvis på nært hold og sett fra døråpningen.	49
4.6	Radiatorer (markert i rødt) omtrent halvveis opp på veggen sørger for oppvarming av klatrehallen på Dragvoll idrettssenter.	50
4.7	Plassering av de seks <i>C.A 1510</i> -målerne i og utenfor klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Kartet er hentet fra nettsiden MazeMap.no.	52
5.1	Illustrasjoner av klatrehallens plassering i bygget. Utklippene er hentet fra arkitekttegninger av plan 001 (første underetasje) fra prosjektunderlaget for Elgesetergate 10.	54
5.2	Utvendige fasadedimensjoner sett fra henholdsvis vest (5.2a) og nord (5.2b). Figurene er skjermbilder av 3D-modellen fra prosjektunderlaget for Elgesetergate 10.	54
5.3	Beregning av skjermingsvinkel for klatrehallens fasade mot vest.	55
5.4	Forenklet illustrasjon av varmetilskudd og tilførsel av kjølt tilluft til klatrehallen. Ønsket romlufttemperatur er $22,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (t_i), dimensjonerende utetemperatur for sommer er $24,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (t_u) og t_s er settpunkttemperatur for tilluften, på $17,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Q_b er beregnet varmetilskudd i klatrehallen ved dimensjonerende sommertemperatur.	59
6.1	Temperaturutviklingen vertikalt langs en klatrevegg sentralt i rommet i Trondheim Klatresenter. Figuren viser målinger gjort mellom klokken 12:00 den 21. februar og klokken 09:30 den 22. februar.	62
6.2	Temperatursjiktning vertikalt langs en klatrevegg i Trondheim Klatresenter når det brukes et gjennomsnitt av alle temperaturmålingene gjort i tidsrommet mellom klokken 12:00 den 21. februar og klokken 09:30 den 22. februar.	63
6.3	Utviklingen i temperatur kanaler og friskluftinntak i Trondheim Klatresenter, samt utendørs, mellom klokken 12:00 den 21. februar og klokken 09:30 den 22. februar.	64
6.4	Temperaturutviklingen i Trondheim Klatresenters tillufts- og avtrekkskammer, friskluftinntak og utendørs gjennom en periode på tre uker, fra den 22. februar til den 15. mars.	65

6.5	Illustrasjon av temperaturer brukt til eksempelberegning av energibehov for oppvarming av tilluft. Uteluft til venstre for figuren, inneluft til høyre. Utelufttemperatur (t_1) på $-10,8$ °C, temperatur etter varmegjenvinneren (t_2) på $12,2$ °C og konstant avtrekkstemperatur (t_4) på $18,0$ °C.	66
6.6	CO ₂ -konsentrasjon ved ulike målepunkter i Trondheim Klatresenter i løpet av perioden fra klokken 12:00 den 21. februar til klokken 08:00 den 22. februar.	68
6.7	Utvikling av CO ₂ -konsentrasjon i Trondheim Klatresenter i perioden fra klokken 12:00 den 21. februar til klokken 08:00 den 22. februar, med logaritmisk skala på y-aksen.	68
6.8	Målt lufttemperatur ved ulike målepunkter i Trondheim Klatresenter i løpet av perioden fra klokken 12.00 den 21. februar til klokken 08.00 den 22. februar.	69
6.9	Relativ luftfuktighet ved ulike målepunkter i Trondheim Klatresenter i løpet av perioden fra klokken 12.00 den 21. februar til klokken 08.00 den 22. februar.	70
6.10	Utvikling av svevestøvkonsentrasjon i Trondheim Klatresenter gjennom dagen den 21. februar 2019.	71
6.11	Utviklingen av svevestøvkonsentrasjon i Trondheim Klatresenter gjennom natten 21. – 22. februar.	71
6.12	Fordeling av svevestøvpartikler på ulike størrelsesfraksjoner. Målingen er utført av Buch og Jensås i Trondheim Klatresenter den 21. februar.	72
6.13	Utvikling i CO ₂ -konsentrasjon ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra 28. mars til 1. april.	75
6.14	Utvikling i CO ₂ -konsentrasjon ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i løpet av døgnet 30. mars.	76
6.15	Utvikling i lufttemperatur ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra 28. mars til 1. april.	77
6.16	Utvikling i relativ luftfuktighet ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra 28. mars til 1. april.	77
6.17	Utvikling i CO ₂ -konsentrasjon, temperatur og relativ luftfuktighet ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra 28. mars til 1. april.	78
6.18	Utvikling i konsentrasjon av svevestøv (PM _{2,5}) i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra 28. mars til 1. april.	79
6.19	Oversikt over besvarelser på spørsmålet "Hvordan oppleves temperaturen i lokalet når du er i aktivitet?" i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Besvarelser er gitt ved å krysse av på en skala fra -3 (veldig kaldt) til 3 (veldig varmt).	81
6.20	Varighetskurve for operativ temperatur og lufttemperatur i klatrehallen i Elgesetergate 10, når det ventileres med en luftmengde på $45 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{m}^2$ som reguleres for å holde lufttemperaturen under $26,0$ °C. Resultatet er hentet fra energiberegninger for klatrehallen i Elgesetergate 10 utført i SIMIEN.	85
6.21	Energibruk til romoppvarming, ventilasjonsvarme, ventilasjonskjøling og vifter for de syv ulike simuleringene av energibehov for klatrehallen i Elgesetergate 10.	86
A.1	Målt temperatur i pappesken som gjennomsnitt av målinger utført av alle de 35 <i>iButton</i> -sensorene.	112

A.2	Målt temperatur fra alle <i>iButton</i> -sensorene, samt gjennomsnittet av disse, for de første 18 målingene av testen.	116
A.3	Plassering av de seks <i>C.A 1510</i> -apparatene ved de to testmålingene.	116
A.4	Måledata fra testen av <i>C.A 1510</i> -inneklimatestere, CO ₂	118
A.5	Måledata fra testen av <i>C.A 1510</i> -inneklimatestere, temperatur.	118
A.6	Måledata fra testen av <i>C.A 1510</i> -inneklimatestere, RF.	119
B.1	Temperatursjiktning vertikalt langs en klatrevegg i Trondheim Klatresenter når det brukes et gjennomsnitt av alle temperaturmålingene gjort i tidsrommet mellom klokken 12:00 og klokken 15:14 den 21. februar.	122
B.2	Temperatursjiktning vertikalt langs en klatrevegg i Trondheim Klatresenter når det brukes et gjennomsnitt av alle temperaturmålingene gjort i tidsrommet mellom klokken 15:14 og klokken 19:24 den 21. februar.	122
B.3	Temperatursjiktning vertikalt langs en klatrevegg i Trondheim Klatresenter når det brukes et gjennomsnitt av alle temperaturmålingene gjort i tidsrommet mellom klokken 19:24 og klokken 23:34 den 21. februar.	123
B.4	Utvikling i svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter ved oppstart av ventilasjonsanlegget den 29.03.2019.	123
B.5	Utvikling i svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter ved oppstart av ventilasjonsanlegget den 30.03.2019.	124
B.6	Utvikling i svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter ved oppstart av ventilasjonsanlegget den 31.03.2019.	124
B.7	Utvikling i svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter ved oppstart av ventilasjonsanlegget den 01.04.2019.	125
D.1	Avstand mellom klatrehallens fasade mot vest og bygningen på motsatt side av veien, og avstand mellom klatrehallens fasade mot nord og trekket i midtrabatten på veien mot nord. Avstandene ble benyttet til å finne skjermingen fra bygningen og trærne. Figuren er laget med utgangspunkt i et skjermbilde fra Google Maps.	135
D.2	Beregning av skjermingsvinkel for klatrehallens fasade mot nord.	135
E.1	Resultat av partikkelmålinger utført av Buch og Jensås i Trondheim Klatresenter den 21. februar, punkt A (foran klatrevegg).	137
E.2	Resultat av partikkelmålinger utført av Buch og Jensås i Trondheim Klatresenter den 21. februar, punkt B (midt i hallen).	138
E.3	Resultat av partikkelmålinger utført av Buch og Jensås i Trondheim Klatresenter den 21. februar, punkt C (i styrkedelen).	138

Tabeller

2.1	Anbefalte normer for svevestøv fra Nasjonalt folkehelseinstitutt (FHI) og Verdens helseorganisasjon (WHO), for 24 timers- og ett års midlingstid.	11
3.1	Inndata til formel 3.1 for beregning av krav til energibehov til oppvarming, hentet fra NS 3701.	31
3.2	Oppsummering av krav fra TEK17, standarden NS 3701 samt offentlige instanser og byggherren som relevans for utformingen av ventilasjonsanlegget i Elgesetergate 10.	39
4.1	Målt lufthastighet i tilluftskanal (Ø800) ut fra aggregatet, samt resulterende luftmengde gjennom kanalen. Verdiene for luftmengder er avrundet.	43
4.2	Plassering av <i>iButtons</i> i den første delen av undersøkelsene av luftkvalitet og -temperatur i Trondheim Klatresenter, 21. – 22. februar 2019.	45
4.3	Plassering av <i>iButtons</i> til langtidsmålinger av temperatur i Trondheim Klatresenter, 22. februar – 15. mars 2019.	45
4.4	Plassering av <i>C.A 1510 ambient air tester</i> -målere i den første delen av undersøkelsene av luftkvalitet og -temperatur i Trondheim Klatresenter, 21. – 22. februar 2019.	46
4.5	Driftstider for ventilasjonsanlegget i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter.	49
4.6	Plassering av <i>C.A 1510 ambient air tester</i> -målere ved undersøkelsene av luftkvalitet og -temperatur i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden 28. mars til 1. april.	51
5.1	Normerte driftstider for idrettsbygning i henhold til NS 3031. ^a Driftstimer oppgis i andre tabeller i standarden (se tabell 5.2).	56
5.2	Normerte driftstimer for varmtvann, utstyr, personer og belysning i bygningskategorien idrettsbygninger i henhold til NS 3031.	56
5.3	Normert varmetilskudd for idrettsbygning i driftstiden i henhold til NS 3701 fra belysning, teknisk utstyr og personer.	57
5.4	Beregnet varmetilskudd i klatrehallen i Elgesetergate 10 klokken 17:00 på en dag med dimensjonerende sommertemperatur.	58
6.1	Beregnet energibehov for oppvarming av tilluft ved varierende settpunkttemperaturer for tilluft.	66
6.2	Høyeste, laveste og gjennomsnittlig måling av CO ₂ -konsentrasjon i perioden fra klokken 12:00 den 21. februar til klokken 08:00 den 22. februar, gitt i ppm, ved de ulike målepunktene i Trondheim Klatresenter.	67

6.3	Momentan CO ₂ -konsentrasjon ved ulike målepunkter i Trondheim Klatresenter den 21. februar. Målingene er utført av Buch og Jensås.	69
6.4	Høyeste, laveste og gjennomsnittlig måling av CO ₂ -konsentrasjon, gitt i ppm, ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra klokken 12:00 den 28. mars til klokken 09:00 den 1. april.	75
6.5	Middelkonsentrasjon av svevestøv (PM _{2,5}) i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter, gitt i $\mu\text{g}/\text{m}^3$	78
6.6	Høyeste registrerte konsentrasjon av svevestøv (PM _{2,5}) i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter, per dag.	79
6.7	PMV og PPD som resultat av spørreundersøkelse om termisk komfort i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter, for de ulike typer sentralmål.	81
6.8	Resultater fra energiberegning av klatrehallen i Elgesetergate 10 ved maksimal luftmengde på $45 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{m}^2$	84
6.9	Resultater fra energiberegning av klatrehallen i Elgesetergate 10 ved maksimal luftmengde på $35 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{m}^2$	84
A.1	Måling nr. 1 – 7 for alle <i>iButton</i> -sensorene.	113
A.2	Måling nr. 8 – 14 for alle <i>iButton</i> -sensorene.	114
A.3	Måling nr. 15 – 18 for alle <i>iButton</i> -sensorene, gjennomsnitt for alle målinger og korreksjonsfaktor for hver sensor.	115
A.4	Gjennomsnittlig endring i de tre indikatorene for alle <i>C.A 1510</i> -målerne, og for hver plassering.	117
A.5	Differanse mellom total endring og endring etter plassering i testen av <i>C.A 1510</i> -målerne.	117
A.6	Måleintervaller og nøyaktighet for <i>C.A 1510 ambient air tester</i> , som oppgitt fra produsenten.	117
E.1	Tidspunkt for målinger av konsentrasjon av partikler i ulike størrelsesfraksjoner ved de fire målepunktene brukt i målingene til Buch og Jensås.	137

Ligninger

2.1	Uttrykket for utregning av PPD som funksjon av PMV.	8
2.2	Uttrykk for relativ luftfuktighet	9
2.3	Uttrykk for utregning av temperaturvirkningsgrad for en varmegjenvinner	13
2.4	Uttrykk for den nominelle tidskonstanten, τ_n	21
2.5	Uttrykk for luftskifteeffektivitet, ϵ^a	22
2.6	Uttrykk for lokal luftskifteindeks, ϵ_p^a	22
2.7	Uttrykk for forurensningsfjerningseffektivitet, ϵ^c	22
2.8	Uttrykk for lokal luftkvalitetsindeks, ϵ_p^c	23
2.9	Arkimedestallet for forhold mellom oppdrifts- og treghetskrefter	24
2.10	Uttrykk for samtidighet i et ventilasjonsanlegg.	27
3.1	Passivhusstandardens krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming.	31
3.2	Passivhusstandardens krav til høyeste spesifikke energibehov til kjøling.	32
3.3	Utslippsbalanse (ZEB-balanse).	36
4.1	Uttrykk for luftmengde i m^3/t som funksjon av tverrsnittsareal (m^2) og lufthastighet (m/s).	42
5.1	Beregning av skjermingsvinkel for klatrehallens fasade mot vest	55
5.2	Beregning av skjermingsvinkel for klatrehallens fasade mot nord	56
5.4	Generelt uttrykk for utregning av luftstrøm (m^3/s) som funksjon av varmeeffekt, temperaturdifferanse og luftens densitet og spesifikke varmekapasitet	58
5.5	Utregning av nødvendig luftmengde (i kg/s) for tilstrekkelig ventilering.	58
6.1	Uttrykk for energibehov til oppvarming av tilluft for et gitt antall driftstimer.	66
6.2	Utregning av nødvendig kjølekapasitet for kjølebatteri ved dimensjonerende sommertemperatur	86

Forkortelser

ASHRAE	The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BIM	Bygningsinformasjonsmodell
CAV	Konstant luftmengde (Constant Air Volume)
CRE	Forurensningsfjerningseffektivitet (Contaminant Removal Effectiveness)
DCV	Behovsstyrt ventilasjon (Demand Controlled Ventilation)
FHI	Nasjonalt folkehelseinstitutt
FHS	Fakultet for helse- og sosialvitenskap, NTNU
LDSA	Lung Deposited Surface Area of Particles
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NTNUI	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitets idrettsforening
PM	Svevestøv (Particulate Matter)
PMV	Forventet middelvotering (Predicted Mean Vote)
PPD	Antatt prosentvis misfornøyde (Predicted Percentage of Dissatisfied)
ppm	Deler per million (parts per million)
RF	Relativ luftfuktighet
RFP	Romfunksjonsprogram
Sit	Studentsamskipnaden i Gjøvik, Ålesund og Trondheim
VAV	Variabel luftmengde (Variable Air Volume)
VVS	Varme-, ventilasjons- og sanitærteknikk
WHO	Verdens helseorganisasjon (World Health Organization)
ZEB	Zero Emission Building

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn

I forbindelse med det pågående campusutviklingsprosjektet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) er det foreslått å bygge en kombinert undervisnings- og forskningsbygning med integrerte idrettsarealer for Studentsamskipnaden i Gjøvik, Ålesund og Trondheim (Sit) i Elgesetergate 10 i Trondheim. Gjennom campusutviklingen skal de ulike fagmiljøene tilhørende NTNU i Trondheim samles i området rundt Gløshaugen (NTNU (2018)). Nybyggets plassering vil være i umiddelbar nærhet til St. Olavs hospital, og studenter ved fakultet for medisin og helsevitenskap ved NTNU vil disponere undervisningsarealene.

Nybygget Elgesetergate 10 skal inneholde omtrent 5000 m² idrettsareal, fordelt på flerbrukshall, klatrehall, saler for spinning, squash, kampsport og yoga, samt kombinerte styrke- og kondisjonsarealer. Studenter og ansatte ved hele NTNU vil disponere delene av bygningen som er satt av til trening og idrett, og nybygget vil dermed være en etterlengtet utvidelse av treningssenterkapasiteten til studentene i Trondheim.

I Norge står bygningsmassen for rundt 40 % av den totale energibruken (Bøeng and Holstad (2013)), og stort fokus vies til reduksjon av bygningers energibehov. Byggherren, Statsbygg, har høye ambisjoner for den planlagte bygningens energieffektivitet. I tillegg til å bygges som passivhus skal Elgesetergate 10 oppnå ZEB (Zero Emission Building)-nivået ZEB-O÷EQ, som innebærer at effektbruk til ventilasjon og oppvarming skal dekkes av bygningens egen fornybare energiproduksjon. Oppnåelse av ZEB-nivået fordrer energigjerrige ventilasjonsløsninger, men samtidig skal strenge krav til inneklimate møtes. Et godt inneklimate er en viktig forutsetning for menneskers helse og trivsel, ettersom voksne personer gjennomsnittlig tilbringer over 90 % av tiden sin innendørs (Novakovic et al. (2007)). For mange er muligheten til å drive med idrett og trening innendørs praktisk og behagelig, og mye aktiv tid tilbringes i et innendørs klima. Personer i høy aktivitet har andre krav til sine omgivelser enn personer i hvile. Forhøyet puls fører til en økning i innånding av luft, og inneluft fri for helseskadelige gasser eller partikler er derfor spesielt viktig i rom beregnet for trening. Lufttemperaturen må ofte være lav i idrettslokaler for å oppleves som behagelig av trenende personer, ettersom kroppen produserer varme ved muskelarbeid. I forbindelse

med utøvelse av klatring er det vanlig å benytte såkalt klatrekalk til avfukting av hendene, for å oppnå et bedre grep. Bruk av kalk forventes i perioder med høyt aktivitetsnivå å forårsake høy konsentrasjon av støvpartikler i rommet. Ved valg av ventilasjonsløsning må det fokuseres på fjerning av svevestøv, slik at hensynet til inneluftkvalitet ivaretas.

De tekniske løsningene for ventilering, oppvarming og kjøling av idrettsarealene i nybygget i Elgesetergate 10 må utformes med mål om å sikre behagelig og trygg inneluft for personer i aktivitet i de ulike rommene. Denne oppgaven undersøker hvordan ulike ventilasjonsløsninger kan bidra til å skape et tilfredsstillende inneklima i bygningens klatrehall.



Figur 1.1: Klatrehallen (markert i rødt) i første underetasje, første etasje og andre etasje på det nordvestlige hjørnet av Elgesetergate 10. Bildet er et skjermbilde fra 3D-modellen utarbeidet i byggeprosjektets tidligfase.

Klatrehallen i Elgesetergate 10 er et stort lokale; gulvarealet er planlagt å være på omtrent 266 m², og med en takhøyde på 14 – 17 meter vil rommet strekke seg over tre etasjer. Rommet er plassert på et hjørne av bygningen, og har dermed to fasader, hvorav begge planlegges utført i glass. I figur 1.1 vises klatrehallens plassering på bygningens nordvestlige hjørne. Rommets takhøyde, samt glassfasadene, kan føre til utfordringer relatert til termisk komfort, og må tas hensyn til i utformingen av ventilasjonsanlegget.

Statsbygg er byggherre for byggeprosjektet, og Backe er entreprenør med avtale om totalentreprise. Cave- rion har utarbeidet konsept for bygningens tekniske anlegg i prosjektets tidligfase, og har foreslått temaet for denne oppgaven. Det må bevilges finansieringsmidler over statsbudsjettet for at byggeprosjektet skal kunne realiseres, og i oktober 2018 ble det klart at prosjektet ikke er prioritert i årets budsjett. Dermed blir det sannsynligvis ikke byggestart i 2019. Det foreligger allerede prosjekteringsunderlag fra tidlige faser i byggeprosjektet, og i arbeidet med denne oppgaven vil det tas utgangspunkt i eksisterende prosjektbeskrivelser når det kommer til krav, arealer, personbelastninger og andre spesifikasjoner som har relevans for arbeidet.

1.2 Problemstillinger og metodikk

Den planlagte bygningen skal oppfylle høye krav til energibruk, og samtidig tilfredsstillende gjeldende krav til inneklima. Gjennom arbeidet utført i forbindelse med denne oppgaven vil ventilasjonsteknisk teori og feltarbeid kombineres, med mål om å kartlegge ulike tekniske løsningsalternativers egnethet til ventilering av klatrehallen i Elgesetergate 10. En anbefalt løsning for ventilering av lokalet vil bli presentert gjennom besvarelse av de følgende spørsmålene:

- I hvilken grad utgjør konsentrasjonen av svevestøv en helsefare for personer som oppholder seg i innendørs klatreanlegg?
- Hvilke spesifikke utfordringer med tanke på inneluftkvalitet og termisk komfort kan oppstå i klatrehallen i Elgesetergate 10?
- Hvilke ventilasjonsløsninger er i bruk i klatreanlegg i dag?
- Hvordan vil valg av luftmengde, temperaturkrav og reguleringsstrategi påvirke energibehovet til ventilering av klatrehallen i Elgesetergate 10?
- Hvordan bør ventilasjonsløsningen for klatrehallen i Elgesetergate 10 tilpasses for å løse utfordringene relatert til helse, inneluftkvalitet og termisk komfort?

Valgt metode for besvarelse av problemstillingene er anvendelse av relevant teori, utførelse av luftmålinger i eksisterende klatreanlegg i Trondheim, samt simuleringer av forventet varme- og kjølebehov for klatrehallen i Elgesetergate 10.

1.3 Avgrensning

Denne oppgaven omhandler ventilering av klatrehallen i Elgesetergate 10. Nybygget skal inneholde mange andre rom for utøvelse av ulike idrettsformer, samt undervisnings- og forskningsareal, og bygningens tekniske anlegg må tilpasses slik at behov i alle bygningens rom dekkes. Utforming av bygningens ventilasjonsanlegg på et overordnet nivå, og til andre rom enn klatrehallen, er utenfor oppgavens omfang og vil ikke undersøkes.

Energiberegninger, inkludert beregning av forventet varme- og kjølebehov gjennom året, vil heller ikke utføres for andre rom i den planlagte bygningen enn klatrehallen. Det innebærer at det ikke vil kunne undersøkes hvorvidt bygningens energibehov vil ligge innenfor de gjeldende kravene for å oppnå passivhusnivå og ZEB-O÷EQ-nivå. Fokus vil være på at klatrehallens ventilasjonsløsning skal levere tilfredsstillende inneklima ved lavt energibehov.

Det skal gjøres undersøkelser av luftkvalitet i to klatreanlegg i Trondheim. Begrensninger knyttet til tid og tilgjengelig utstyr innebærer at undersøkelsene vil være relativt enkle. Indikatorene temperatur, CO₂-nivå og relativ luftfuktighet, samt konsentrasjon av PM_{2,5}, vil måles på utvalgte målepunkter i lokalene. Mer omfattende undersøkelser, på flere målepunkter og over lengre tid, ville gitt et enda bedre grunnlag for vurderingen av egnet ventilasjonsløsning.

Det skal anbefales en ventilasjonsløsning for klatrehallen i Elgesetergate 10, men oppgaven går ikke ut på å prosjektere et ferdig system. Det vil derfor konkluderes med hvilket ventilasjonsprinsipp som ansees å være best egnet, samt gis enkelte generelle anbefalinger omhandlende luftmengde, temperaturkrav og reguleringsstrategi. En detaljert funksjonsbeskrivelse av anleggets driftstider, regulering, dimensjonering samt plassering av komponenter som aggregat, spjeld, lydempere og så videre er utenfor oppgavens omfang, og vil ikke inkluderes.

1.4 Rapportens struktur

Dette innledende kapitlet presenterer bakgrunnen og fokusområdet for oppgaven, og gir en kortfattet beskrivelse av byggeprosjektet Elgesetergate 10 samt av bygningens planlagte klatrehall. Innledningen definerer videre en avgrensning for arbeidet som skal gjøres.

Kapittel 2, Teoretisk bakgrunn, gir en innføring i de teoretiske emner som vurderes å være nødvendige for på en god måte å kunne besvare oppgavens problemstilling. Grunnleggende begrep og prinsipper innenfor ventilasjonsteknikk og inneklima beskrives. Det skal gjøres en kvalifisert evaluering av løsninger for ventilering av et rom med stor takhøyde og høy intern luftforurensning, og deler av det teoretiske grunnlaget som presenteres fokuserer derfor på slike rom. Denne rapporten inneholder ikke et eget kapittel viet til litteraturstudie; relevante funn fra litteraturen inkluderes i kapittel 2.

Kapittel 3, Krav og belastninger i klatrehallen i Elgesetergate 10, presenterer de krav som nybygget skal oppfylle og som vurderes å være relevante for utformingen av ventilasjonsanlegget i klatrehallen. I tillegg til å møte krav fra Byggteknisk forskrift skal bygningen utføres i henhold til passivhusstandarden, sertifiseres etter BREEAM-NOR og oppnå ZEB-nivået ZEB-O÷EQ.

Kapittel 4, Målinger, beskriver fremgangsmåte for luftmålinger utført i to innendørs klatreanlegg i Trondheim; Trondheim Klatresenter og klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Kapitlet presenterer hvilke luftkvalitetsindikatorer som er blitt målt, hvilket måleutstyr som er benyttet, og plassering av måleapparatene i lokalene. På Dragvoll har det blitt utført en spørreundersøkelse om inneklima; denne beskrives også i kapittel 4.

Kapittel 5, Beregning av forventet varme- og kjølebehov, presenterer utarbeidelsen av en energiberegningsmodell for klatrehallen i Elgesetergate 10, i simuleringprogrammet SIMIEN. Klatrehallens utforming, plassering og bruksmønster beskrives, og hvilke simuleringer som er blitt gjort legges frem.

Kapittel 6, Resultater, presenterer resultatene det er kommet frem til gjennom målingene og spørreundersøkelsen beskrevet i kapittel 4, og energiberegningene beskrevet i kapittel 5.

Kapittel 7, Diskusjon, drøfter resultatene fra kapittel 6 i lys av relevant teori, og med fokus på problemstillingene denne oppgaven tar sikte på å besvare. Gjennom diskusjonen vil anbefalinger for utforming av ventilasjonsløsning for klatrehallen i Elgesetergate 10 bli gitt, basert på det teoretiske grunnlaget fra kapittel 2, samt resultater fra målinger av luftkvalitetsindikatorer i eksisterende klatreanlegg og energiberegninger for den planlagte klatrehallen. Kapittel 7 inneholder videre en kritisk evaluering av metodene som er benyttet i arbeidet med denne oppgaven.

Kapittel 8, Konklusjon, oppsummerer de viktigste aspektene fra oppgaven, og besvaring av problemstillingene presentert i kapittel 1.2 vektlegges.

Kapittel 9, Videre arbeid, presenterer forskningstema som har vært utenfor denne oppgavens omfang, men som vurderes å kunne gi verdifull kunnskap dersom de blir undersøkt videre.

Kapittel 2

Teoretisk bakgrunn

Denne oppgavens problemstillinger dreier seg i stor grad om utforming og regulering av et ventilasjonssystem, og en forståelse for enkelte grunnleggende prinsipper innenfor ventilasjonsteknikk må derfor ligge til grunn for en forståelse av oppgavens innhold. Videre vil inneklimate, spesifikt termisk- og atmosfærisk innemiljø, være sentralt. Dette kapitlet introduserer og beskriver faglige begrep og konsepter innenfor fagene ventilasjon og inneklimate som anses å være relevante.

2.1 Inneklimate i bygninger

De fleste mennesker tilbringer en stor andel, ofte over 90 %, av tiden sin innendørs, enten i hjemmet, på et undervisningssted eller på arbeidsplassen (Novakovic et al. (2007)). Det betyr at over 90 % av luften vi puster inn er inneluft. Følgelig har kvaliteten på inneluft i bygninger beregnet for opphold stor betydning for helse og trivsel, og tekniske løsninger både for å skifte ut romluft, for å måle romluftens tilstand og for å styre tilførsel av frisk luft blir avgjørende for å sikre god helse og trivsel for personer som oppholder seg i en bygning. Dette kapitlet introduserer inneklimate generelt, og inneholder en kortfattet beskrivelse av luftkvalitet i innendørs klatreanlegg.

2.1.1 Inneklimate-begrepet og sentrale indikatorer

Gjennom Byggeteknisk forskrift (TEK17) stilles det krav om at alle bygninger som oppføres i Norge i dag blant annet skal ha et ventilasjonssystem som sikrer tilfredsstillende luftkvalitet og termisk inneklimate (Direktoratet for byggkvalitet (2017c)). Innendørs klimate og luftkvalitet kan beskrives med bakgrunn i en rekke parametre, blant annet *termisk komfort* og *operativ temperatur*. De nevnte parametrene vil her beskrives kort. *Inneklimate*-begrepet i seg selv inkluderer fem faktorer; termisk miljø, atmosfærisk miljø, akustisk miljø, aktivt miljø og mekaniske omgivelser (Ingebrigtsen (2018a)). For denne oppgaven er det spesielt termisk- og atmosfærisk miljø som er relevant. Termisk miljø handler om menneskelig varmebalanse og termisk komfort, eller enkelt forklart om hvor varmt eller kaldt det er i et rom, og hvor varmt

eller kaldt personene som oppholder seg der ønsker å ha det. En rekke faktorer påvirker hvilken temperatur mennesker opplever som komfortabel, hvorav de viktigste er bekledning, aktivitetsnivå, oppholdstid i rommet og sinnstilstand (Ingebrigtsen (2018a)).

I standarden NS-EN 7730 ("Ergonomi i termisk miljø – Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort") defineres *termisk komfort* som "den sinnstilstanden som gir uttrykk for tilfredsstillelse med de termiske omgivelsene" (Standard Norge (2006)). Termisk nøytralitet, det vil si at man ikke ønsker varmere eller kaldere omgivelser, er en av forutsetningene for termisk komfort. En annen forutsetning er fravær av lokalt termisk ubehag. Lokalt termisk ubehag kan oppstå når en del av kroppen utsettes for en uønsket termisk påvirkning, som for eksempel kald trekk fra et vindu eller en kald overflate, eller varm stråling fra en radiator (Novakovic et al. (2007)). Termisk komfort regnes som en sentral forutsetning for produktivitet (Taylor et al. (2008)). Kostnader forbundet med tap av produktivitet på grunn av dårlig inneklima, ofte relatert til termisk miljø, kan for en bedrift være mye høyere enn kostnadene forbundet med varme og ventilasjon (Novakovic et al. (2007)).

En velkjent og mye brukt metode for kartlegging av termisk komfort ble presentert av den danske inneklimaprofessoren Povl Ole Fanger i 1970 (Fanger (1970)). Fanger foreslo to indikatorer for termisk komfort; forventet middelvotering, PMV (Predicted Mean Vote) og antatt prosentvis misfornøyde, PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). PMV kan regnes ut ved kjent metabolsk nivå, isolasjonsnivå på bekledning, lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, lufthastighet og luftfuktighet (Nilsson et al. (2003)), og PPD kan regnes ut ved kjent PMV. PMV-indeksen er ment å forutse hva en stor gruppe forsøkspersoner ville svart på en 7-punktsskala fra -3 til 3, hvor det skal krysses av for hvordan den termiske komforten i gitte omgivelser oppleves. På skalaen representerer -3 veldig kaldt, -2 kaldt, -1 litt kaldt, og tilsvarende opp til 3 (veldig varmt) på den positive aksehalvdelen. Termisk nøytralitet uttrykkes ved å krysse av for 0. Dersom PMV for gitte omgivelser er kjent, enten ved at man har beregnet verdien med bakgrunn i de nevnte parameterne eller ved at man har utført en undersøkelse blant en forsøksgruppe, kan PPD beregnes ved hjelp av uttrykket gitt i formel 2.1 (Ingebrigtsen (2018a)). PPD er en indikator som anslår hvor mange prosent av personene som oppholder seg i et rom som vil være misfornøyde med de termiske omgivelsene. Den laveste mulige verdien for PPD er 5 %, ved en PMV-verdi på 0. Det vil si at selv ved "optimale" termiske omgivelser vil alltid en liten prosentandel være misfornøyde.

$$PPD = 100 - 95 * \exp(-0,03353 * PMV^4 - 0,2179 * PMV^2) [\%] \quad (2.1)$$

Parameteren *operativ temperatur* brukes ofte i vurderingen av termisk komfort. Operativ temperatur er definert som "den uniforme temperaturen av omkringliggende luft og overflater som resulterer i det samme varmetapet som de faktiske omgivelsene" (Nilsson et al. (2003)), og kan beregnes som det vektete gjennomsnittet av lufttemperatur og gjennomsnittlig strålingstemperatur. Strålingstemperaturen er den gjennomsnittlige temperatur av alle overflater som omslutter målepunktet.

I tillegg til riktig temperatur er det ønskelig at romluft er, i så stor grad som mulig, fri for ubehagelig eller helseskadelig luftforurensning. Et godt atmosfærisk miljø forutsetter at dette oppfylles. Begrepene

atmosfærisk miljø og luftkvalitet blir brukt om hverandre, men begge omhandler sammensetningen og konsentrasjonen av ulike gasser, lukter, kjemiske stoffer og partikler (Ingebrigtsen (2018a)). Luftkvalitet, slik den oppleves av mennesker, kan kvantifiseres ved hjelp av enhetene *olf* og *decipol*. En *olf* defineres som luftforurensning fra en standardperson, det vil si en stillesittende voksen person ved termisk nøytralitet. En *decipol* defineres som opplevd luftforurensning i et rom forurenset med én *olf* og ventilert med en luftmengde på 10 l/s uforurenset luft. (Sørensen (1996))

Inneluftkvalitet defineres av The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) som fravær av forurensninger i konsentrasjoner som kan ha skadelig effekt på menneskers og dyrs helse, og hvor minst 80 % av utsatte personer ikke gir uttrykk for misnøye med luftkvaliteten (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2013)). Uteluftens forurensning (eksos og annen utendørs luftforurensning), utslipp fra personer (tobakksrøyk og biologiske utslipp) samt utslipp fra bygningen, først og fremst emisjoner fra materialer, er faktorene som har størst betydning for inneluftkvaliteten. Konsentrasjonen av karbondioksid (CO₂) brukes ofte som en indikator for inneluftkvalitet. Forsøk har vist en sammenheng mellom høy CO₂-konsentrasjon og ned-satt produktivitet, ytelse og trivsel (Myhrvold et al. (1996), Satish et al. (2012a), Satish et al. (2012b)), og det anses som avgjørende for et tilfredsstillende inneklimate at CO₂-konsentrasjonen holdes under et visst nivå. CO₂-nivå er videre en god indikator på hvor mange personer som befinner seg i et rom, ettersom mennesker produserer CO₂ ved respirasjon.

2.1.2 Fuktig luft

Fuktinnholdet i inneluft har betydning for personers opplevelse av komfort og kan føre til bygningsmessige skader, og er derfor et viktig aspekt å ta hensyn til i prosjekteringen av luftbehandlingsanlegg. Luft hentet inn utenfra består av tørr luft og en andel vanndamp som varierer med årstid og geografisk lokasjon. Sammensetningen av tørr luft og vanndamp omtales som fuktig luft, og hvor stor andel av den fuktige luften som består av vanndamp kan beskrives på ulike måter, blant annet som forholdet mellom vanndamp og tørr luft gitt i kg vann/kg tørr luft, og relativ luftfuktighet gitt i prosent (Sørensen (1996)). Relativ luftfuktighet (RF) beskriver forholdet mellom det faktiske fuktinnholdet i luften og det høyeste mulige fuktinnholdet i luft ved samme temperatur, og kan beregnes ved hjelp av uttrykket gitt i formel 2.2 (Sørensen (1996)). Uteluft har lavt fuktinnhold om vinteren og høyere om sommeren, og vanninnholdet i uteluften i et nordisk klima kan variere mellom 1 og 12 g vann/kg tørr luft gjennom året (Ingebrigtsen (2018a)). Relativ luftfuktighet i uteluft er likevel ofte høy om vinteren, ettersom kald luft kan holde på mindre væske enn varm luft, og metningstrykket dermed blir lavere når temperaturen synker.

$$RF = \frac{p_{vd}}{p_m} \quad (2.2)$$

Hvor p_{vd} er vanndamptrykk og p_m er metningstrykk, det vil si lufttrykket når luften inneholder høyeste mulig andel vanndamp.

Omgivelsesluftens fuktighetsinnhold har flere fysiske innvirkninger på mennesker; den påvirker både hvor

mye man svetter, hvor mye vann som fordamper fra huden og hvor høyt fuktinnhold utåndet luft har (Höppe and Martinac (1998)). Mennesker tolererer godt variasjoner i luftfuktighet (Nasjonalt folkehelseinstitutt (2015)), men opplever luftens fuktinnhold som mest komfortabel når den relative luftfuktigheten ligger omtrent i området mellom 25 % og 60 % (Novakovic (2017)). Opplevelse av tørr luft skyldes ofte forhøyede nivåer av partikler og andre irritanter i luften, og ikke nødvendigvis at luftens fuktinnhold faktisk er ubehagelig lavt (Nasjonalt folkehelseinstitutt (2015)). Menneskers innendørs omgivelser påvirkes også av luftfuktigheten. Ved svært lav luftfuktighet kan materialer av tre trekke seg sammen, maling eller annen overflatebehandling kan tørke og sprekke opp, og man kan oppleve problemer relatert til statisk elektrisitet (Höppe and Martinac (1998), Novakovic (2017)). Ved høy luftfuktighet kan vann kondensere på kalde overflater, for eksempel på innsiden av vinduer eller dårlig isolerte yttervegger. Kondens kan over tid forårsake fuktskader på bygningsmaterialer, i tillegg til å skape gunstige forhold for fremvekst av potensielt helseskadelig muggsopp (Höppe and Martinac (1998)).

2.1.3 Luftkvalitet i innendørs klatreanlegg

Enkelte avsnitt i dette kapitlet er i hovedsak basert på stoff fra min prosjektoppgave "Ventilering av idrettsarealer i idrettsbygg for Sit", skrevet høsten 2018. Det er gjort tilføyelser og endringer i teksten.

I alle typer idrettsanlegg forventes det høy aktivitet, og i innendørs anlegg vil luften inneholde forurensninger, produsert både av personer i aktivitet og av utstyr som brukes hyppig og ofte med stor mekanisk belastning. I innendørs klatreanlegg er spesielt støv en svært merkbar type luftforurensning; ofte er overflater dekket av et fint lag hvitt støv. En stor andel av støvet som finnes i innendørs klatreanlegg har sin opprinnelse i klatrekalk. Innenfor idretter som klatring og turn benyttes ofte kalk for å absorbere fuktighet i håndflatene, slik at det skapes mer friksjon mellom hendene og for eksempel et treningsapparat eller en klatrevegg, og utøveren dermed får et bedre grep. Stoffet som benyttes blir ofte omtalt som "kalk", men mer presist dreier det seg om magnesiumkarbonat (Kulturdepartementet og Norges klatreforbund (2015)). Studier har vist at bruken av magnesiumkarbonat, eller klatrekalk, kan føre til svært høye konsentrasjoner av svevestøv i innendørs klatreanlegg (Weinbruch et al. (2008)).

Magnesiumkarbonat er klassifisert som et hygroskopisk materiale, det vil si at det er et materiale som absorberer fuktighet fra omgivelsene (National Center for Biotechnology Information (2019)). Påført hendene i pulverform vil kalk trekke til seg fuktighet fra svette eller andre kilder, og holde hendene tørre. Magnesiumkarbonat er ikke løselig i vann, og vil derfor fortsette å fungere selv ved kontinuerlig svetteproduksjon i hendene. Det er ikke gjort funn som indikerer at magnesiumkarbonat i små doser er skadelig for mennesker, men når stoffet benyttes i forbindelse med klatreaktivitet blir støv spredt i romluften.

I evalueringen av innendørs luftkvalitet er utbredelsen av og partikkelstørrelsen til svevestøv et viktig aspekt. Å bli eksponert for svevestøv over tid kan føre til alvorlige skader og sykdommer blant annet i det kardiovaskulære systemet (Brook et al. (2010)) og i respirasjonssystemet (Pope and Dockery (2006), Valavanidis et al. (2008)). Sammenheng mellom eksponering for svevestøv og lungekreft har også blitt vist (Pope et al. (2002)). I rom for utøvelse av idrett er eksponering for svevestøv spesielt viktig å ta hensyn til. Ved høyere hjertefrekvens, som man må regne med i utøvelsen av de aller fleste fysiske idretter, puster man inn mer luft. Dermed vil en person i aktivitet puste inn en større mengde partikler enn en

Tabell 2.1: Anbefalte normer for svevestøv fra Nasjonalt folkehelseinstitutt (FHI) og Verdens helseorganisasjon (WHO), for 24 timers- og ett års midlingstid.

Partikkelstørrelse:	< 2,5 μm	< 10 μm
Anbefalt norm FHI	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 timer) 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 år)	– –
Anbefalt grenseverdi WHO	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 timer) 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 år)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 timer) 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 år)

person i hvile. Når mengden luft som inhaleres øker, skifter man i tillegg fra å puste gjennom nesen til å puste gjennom munnen. Ved innånding gjennom nesen filtreres luften i nesegangen. Denne effekten forsvinner når man skifter til å puste gjennom munnen, og partiklene får en friere vei til luftrør og videre gjennom respirasjonssystemet. Videre har det blitt vist at lufthastighet gjennom pusterøret vil øke med økende luftmengde, slik at partiklene dras dypere inn i respirasjonssystemet (Carlisle and Sharp (2001)). De minste partiklene (< 2,5 μm i diameter) beveger seg lengst inn i respirasjonssystemet hos mennesker og gjør størst skade.

Byggteknisk forskrift stiller krav til luftkvalitet i bygninger, og i veiledningen til annet ledd av § 13-1 henvises det til Folkehelseinstituttets (FHI) rapport "Anbefalte faglige normer for inneklima - Revisjon av kunnskapsgrunnlag og normer." Rapporten deler svevestøv (Particulate Matter – PM) inn i tre størrelseskategorier basert på partiklenes aerodynamiske diameter; ultrafine partikler ($\text{PM}_{0,1}$), fine partikler ($\text{PM}_{2,5}$) og grove partikler ($\text{PM}_{10-2,5}$). $\text{PM}_{0,1}$ er partikler med diameter på mindre enn 100 nm, $\text{PM}_{2,5}$ er partikler med diameter på mindre enn 2,5 μm , og $\text{PM}_{10-2,5}$ er partikler med diameter på mindre enn 10 μm , men større enn 2,5 μm . I rapporten fra FHI anbefales det en årsmiddelnorm for fine partikler i inneluft på 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, og tilsvarende 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for 24 timers midlingstid (Nasjonalt folkehelseinstitutt (2015)). Folkehelseinstituttet oppgir ingen grenseverdi for $\text{PM}_{10-2,5}$. Verdens helseorganisasjon (World Health Organization – WHO) oppgir grenseverdier på henholdsvis 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for 24 timers midlingstid og et års midlingstid for $\text{PM}_{2,5}$, og henholdsvis 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for 24 timers midlingstid og et års midlingstid for PM_{10} (World Health Organization (2018)). Tabell 2.1 oppsummerer anbefalingene for innendørs konsentrasjon av svevestøv fra Folkehelseinstituttet og WHO.

I en tysk studie fra 2008 ble det observert gjennomsnittlige konsentrasjoner av PM_{10} på 200 – 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i undersøkte klatreanlegg, men i perioder med høy aktivitet kunne konsentrasjonene komme opp i størrelsesordenen 1000 – 4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. For fine partikler, $\text{PM}_{2,5}$, var tilsvarende observasjoner på 30 – 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gjennomsnittlig, og opp mot 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ved høy aktivitet. (Weinbruch et al. (2008))

Materielemisjoner

Langvarig eksponering for innendørs luftforurensning i skadelige konsentrasjoner utgjør idag en betydelig helsefare for mennesker verden over (World Health Organization (WHO) (2010)). En av hovedårsakene til at tilstedeværelsen av helseskadelig luftforurensning innendørs øker er at det stadig utvikles nye produkter og materialer som tas med inn i bygninger (Yang (1999), Novakovic et al. (2007)). Gulvtepper, møbler og maling er eksempler på materialer som kan avgi luftforurensning til et rom.

Innendørs luftforurensning er mindre kjent for den generelle offentligheten enn utendørs luftforurensning, men er like fullt en forutsetning for god helse hos mennesker (World Health Organization (WHO) (2010)). Derfor stilles det krav i TEK17, §13-1, til at det må dokumenteres at produkter til bruk i nye bygninger, og som kan påvirke inneluften i byggverk, er lavemitterende (Direktoratet for byggkvalitet (2017c)). Dersom dette ikke kan dokumenteres, eller dersom det er kjent at bygningsmaterialene er høyemitterende, stilles det krav til en høyere grunnventilasjon enn ved dokumentert lavemitterende materialer.

I idrettsbygninger kan emisjoner fra bygningsmaterialer være en større utfordring enn i enkelte av de andre bygningskategoriene. Dette skyldes at bygninger beregnet for utøvelse av idrett ofte har stort areal per person, slik at forholdet mellom mengden materialer og antall personer blir større enn det som er utgangspunktet for krav til luftmengde på grunn av materialer. I tillegg brukes ofte spesielle materialer som emitterer andre typer og mengder av forurensninger i idrettsbygninger (Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT) (2017)).

2.2 Ventilasjonsprinsipper

2.2.1 Generelt om ventilasjonsanlegget

Enkelte avsnitt i dette kapitlet er i hovedsak basert på stoff fra min prosjektoppgave "Ventilering av idrettsarealer i idrettsbygg for Sit", skrevet høsten 2018. Det er gjort tilføyelser og endringer i teksten.

En forutsetning for å kunne tilfredsstille krav til termisk komfort og inneluftkvalitet er korrekt dimensjonerte og utførte varme-, ventilasjons- og sanitærtekniske (VVS) systemer. Disse systemene omfatter løsninger for oppvarming, kjøling, ventilering og håndtering av vann og kloakk. Ventilasjonssystemets hovedoppgave er å sørge for at forurenset romluft erstattes med frisk luft, men ventilasjonsluft kan også brukes til oppvarming og kjøling, og slik bidra til termisk komfort. Det skilles mellom naturlig ventilasjon, mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon (Ingebrigtsen (2018a)). Naturlig ventilasjon baserer seg på trykkforskjeller og naturlige drivkrefter som vind og sol, og kan være så enkelt som et åpent vindu, eller det kan være et svært komplekst system. Bortsett fra i enkelte boliger og eldre bygninger vil naturlig ventilasjon ikke være tilstrekkelig for å sikre termisk komfort og inneluftkvalitet, og man må ta i bruk mekanisk ventilasjon (Novakovic et al. (2007)). Ved mekanisk ventilasjon brukes vifter til å trekke inn frisk luft utenfra, og til å distribuere luft til de ulike delene av bygningen. Tilsvarende brukes en avtrekksvifte til å trekke forurenset luft ut. Hybridventilasjon kombinerer naturlig og mekanisk ventilasjon med mål om å utnytte fordelene ved begge løsninger, og slik oppnå optimal utnyttelse av anlegget med tanke på både termisk komfort og luftkvalitet (Niachou et al. (2008)).

Begrepene tilluft, friskluft, avtrekksluft, og avkastluft brukes her som illustrert i figur 2.1. Friskluft er luft som trekkes inn utenfra gjennom et friskluftinntak, og i motsatt ende er avkastluft den luften som føres ut til uteluften gjennom en avkastrist. Tilluft er behandlet (filtrert og eventuelt oppvarmet eller kjølt) luft som tilføres rommene i bygningen, og avtrekksluft er forurenset romluft som trekkes ut.

Friskluft behandles i et ventilasjonsaggregat (også kalt luftaggregat) før den distribueres videre ut på



Figur 2.1: Grafisk illustrasjon av bruken av begrepene friskluft, tilluft, avtrekksluft og avkastluft.

kanalnettet. I ventilasjonsaggregatet blir luften filtrert for å fjerne uønsket luftforurensning som har blitt med utenfra, og varmet opp eller kjølt ned etter behov. Varmegjenvinnere benyttes for å overføre varme fra avtrekksluften til tilluften. Varmegjenvinneren er en sentral del av ventilasjonsaggregatet, og kan utformes på flere ulike måter. Gjenvinning av varme fra avtrekksluft utgjør en betydelig energibesparelse, spesielt i kalde klima hvor det er oppvarmingsbehov store deler av året, og er helt avgjørende dersom man har ambisjon om en energieffektiv bygning. Hvor effektivt en varmegjenvinner overfører varme fra avtrekksluft til tilluft karakteriseres ved hjelp av gjenvinnerens temperaturvirkningsgrad, som kan beregnes ved hjelp av uttrykket gitt i formel 2.3 (Novakovic et al. (2007)).

$$\eta = \frac{t_t - t_u}{t_a - t_u} \quad (2.3)$$

Hvor t_t er tilluftstemperaturen etter varmegjenvinneren, t_u er temperaturen før varmegjenvinneren og t_a er avtrekkstemperaturen.

Ventilasjonsanlegg kan kategoriseres etter måten luftmengden i systemet reguleres. Det skilles mellom systemer med konstant luftmengde (Constant Air Volume – CAV) og systemer med variabel luftmengde (Variable Air Volume – VAV). I CAV-systemer holdes tilført luftmengde til en sone konstant, mens lufttemperaturen varieres. Lufttemperaturen kan endres enten før luften blir tilført sonen, det vil si ved hjelp av et varme- eller kjølebatteri i ventilasjonsaggregatet, eller etter at den har blitt tilført til sonen, ved hjelp av en radiator eller annen lokal oppvarming. I VAV-systemer holdes lufttemperaturen konstant, og tilført luftmengde varieres for å møte behovet til enhver tid. (Nilsson et al. (2003)) Det betyr ikke at lufttemperaturen ikke kontrolleres i VAV-systemer; friskluft vil alltid behandles for å oppnå en bestemt settpunkttemperatur før den tilføres en sone. Ofte vil det benyttes både VAV og CAV i samme bygning; i slike tilfeller tilpasses valg av system etter rommets behov. Innenfor samlebetegnelsen VAV ligger konseptet behovsstyrt ventilasjon (Demand Controlled Ventilation – DCV). DCV vil bli beskrevet i kapittel 2.5.1, og går derfor ikke nærmere inn på her.

Et ventilasjonsanlegg som i sin helhet baseres på CAV-prinsippet vil være unødig energikrevende, fordi det i deler av driftstiden vil ventileres i rom som står tomme. Med VAV unngår man i større grad å ventilere når det ikke er behov for det. På den andre siden er investeringskostnadene for VAV-anlegg høyere enn for CAV-anlegg. En vanlig løsning er derfor en kombinasjon av de to prinsippene, hvor VAV anvendes på store rom med varierende belastning, og CAV anvendes på mindre rom hvor man enklere kan forutsi belastningen. Et godt eksempel på rom egnet for CAV er kontor beregnet på én person, hvor ventilasjonen

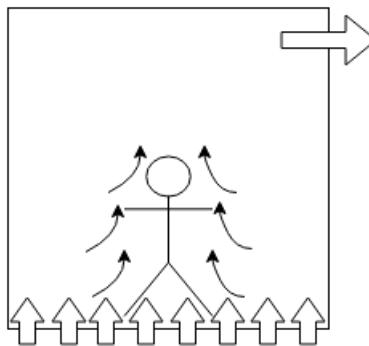
kan styres etter tilstedeværelse, det vil si om personen er på kontoret eller ikke. En svært stor andel av norske bygningers energibruk går med til oppvarming, kjøling og ventilasjon (Novakovic et al. (2007)), og en reduksjon i disse energipostene er derfor avgjørende for å være i stand til å redusere energibruk i bygninger.

Ventilasjonsanlegg kategoriseres videre ut fra det valgte prinsippet for luftfordeling på romnivå. De vanligste prinsippene som ligger til grunn i mekaniske ventilasjonsanlegg vil være sentrale i arbeidet med denne oppgaven, og vil derfor bli gått nærmere inn på i de kommende delkapitlene.

2.2.2 Fortrengningsventilasjon

Enkelte avsnitt i dette kapitlet er i hovedsak basert på stoff fra min prosjektoppgave "Ventilering av idrettsarealer i idrettsbygg for Sit", skrevet høsten 2018. Det er gjort tilføyelser og endringer i teksten.

Prinsippet som ligger til grunn for ventilasjon ved hjelp av fortregning er oppdriftskraften i varm luft. I et rom med fortrengningsventilasjon tilføres tilluften gjennom gulvet, eller gjennom tilluftsventiler nært gulvet, og sprer seg utover i et lavtliggende lag. Når tilluften kommer i kontakt med varmekilder i rommet, for eksempel personer eller utstyr, varmes den opp og begynner å stige, som vist i figur 2.2. Den stigende luften beveger seg med en noe høyere hastighet enn luften som strømmer langs gulvet, og mengden luft som strømmer oppover rundt varmekilden øker med høyden over gulvet. Er varmekilden en person, vil den stigende luften ta med seg luftforurensning generert av personen på vei opp. I et rom med korrekt dimensjonert og utført fortrengningsventilasjon vil det dannes et forurenset luftlag i den øverste delen av rommet. Det forurensete luftlaget må ligge høyt nok til at det ikke er i oppholdssonen til en stående person. Avtrekksventiler plasseres nært himlingen, slik at den forurensete, varme luften trekkes ut.



Figur 2.2: Prinsippet bak fortrengningsventilasjon. Figur utarbeidet med inspirasjon fra Nilsson et al. (2003).

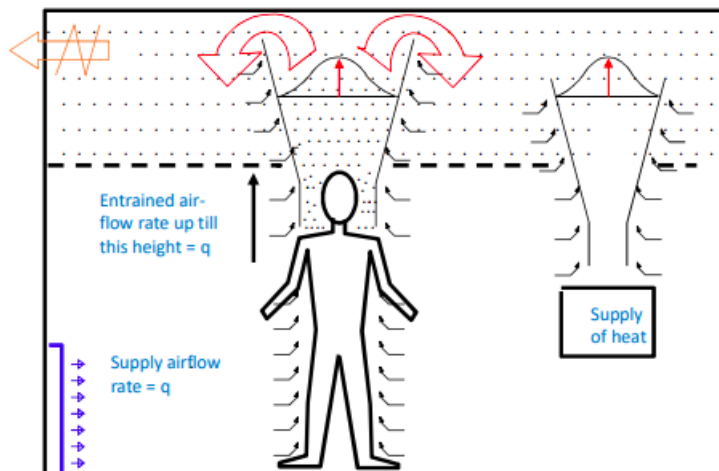
For at ventilasjon ved hjelp av fortregning skal være mulig, er det avgjørende at den tilførte tilluften har lavere temperatur enn luften i rommet. Dersom tilluften har høyere temperatur enn romluften vil den få oppdrift med det samme den tilføres rommet. I dette tilfellet får man det som kalles kortslutning, hvor tilluften stiger direkte til avtrekket uten å ventilere rommet.

Kald tilluft tilført i rommets oppholdssone gir risiko for trekk, som er den vanligste årsaken til klager på termiske omgivelser i kontorbygg (Nilsson et al. (2003)). For å minimere risikoen for uønsket trekk i rom

med fortrenningsventilasjon bør hastigheten på den tilførte luften være lav. Ved å bruke tilluftsventiler med stor overflate kan man likevel tilføre ønsket luftmengde til rommet.

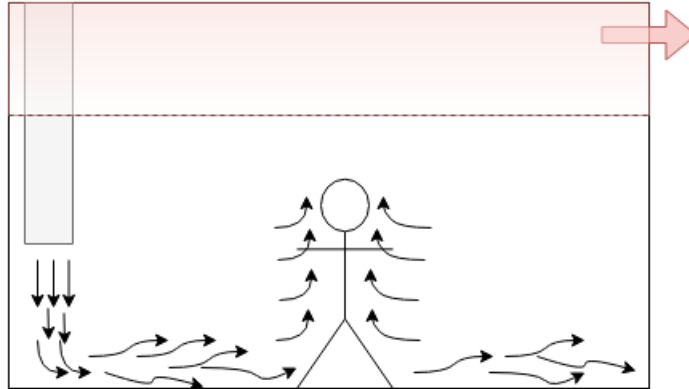
Fortrenningsventilasjon egner seg for store rom hvor det er høyt under taket, for eksempel auditorier, teatersaler, verksted og lignende (Yuan et al. (1998)). I følge Skistad et al. (2002) er fortrenningsventilasjon å foretrekke i de fleste rom med takhøyde på over tre meter. De største fordelene ved fortrenningsventilasjon er bedre luftkvalitet i oppholdssonen og energibesparelse. Grunnen til at fortrenningsventilasjon er mer energieffektivt enn det vanligste alternativet, omrøringsventilasjon, er at det ved fortrenning trengs en lavere luftmengde for å oppnå tilsvarende luftkvalitet som ved omrøring. Dermed vil systemets vifteeffekt bli lavere. I tillegg kan det ved fortrenning utnyttes lengre perioder med frikjøling, det vil si kjøling ved hjelp av uteluft i perioder med stort kjølebehov, enn det som er mulig ved omrøring. Ulemper ved fortrenningsventilasjon er risiko for trekk, og at systemet er uegnet til bruk for oppvarming ettersom tilluften må ha lavere temperatur enn romluften for at prinsippet skal fungere. (Yuan et al. (1998), Novakovic et al. (2007)) I byggeprosjekter hvor energieffektivitet tillegges stor vekt velges ofte fortrenningsventilasjon, eksempelvis i de prosjektene Powerhouse Brattørkaia (bygg (2018)) og Powerhouse Kjørbo (Lassen (2018)), to av Norges første bygninger som genererer mer fornybar energi enn de selv trenger i løpet av livstiden (Powerhouse (2018)).

Figur 2.3 gir en mer detaljert illustrasjon av prinsippet med fortrenningsventilasjon. En luftmengde, q , tilføres nært gulvet, stiger opp rundt varmekildene i rommet og skaper en forurenset sone, før den forurensete, varme luften til slutt trekkes ut gjennom avtrekket nært himlingen.



Figur 2.3: Illustrasjon av prinsippet med fortrenningsventilasjon. Luft tilføres ved gulvet, stiger når det kommer i kontakt med varmekilder, og trekkes ut nært himlingen. Figuren er gjengitt med tillatelse fra Hans Martin Mathisen.

Fortrenningsventilasjon kan også utformes med tilluftstilførsel ovenfra. I slike systemer tilføres luft gjennom en kanal som føres ned i rommet og ender ved en bestemt høyde over gulvet. Lufthastigheten som benyttes i et slikt system er lavere enn i luftstråler fra ventiler for omrøringsventilasjon, men høyere enn for konvensjonelle fortrenningsventilasjonsventiler (Karimipannah et al. (2000)). Med tilførsel av tilluft



Figur 2.4: Illustrasjon av prinsippet bak fortreningsventilasjon med tilluftstilførsel ovenfra. Figuren er utarbeidet etter inspirasjon fra Karimipanah et al. (2000).

ovenfra kan det utformes et system basert på fortregning som også inkluderer noen av fordelene ved omrøringsventilasjon, primært muligheten til å benytte ventilasjonsanlegget til oppvarming (Karimipanah and Awbi (2002)). Når tilluften forsynes rommet som en nedadgående luftstråle med høy hastighet vil luftens bevegelsesmengde være tilstrekkelig til å sørge for at luften treffer gulvet og spres utover, selv om den tilførte luften ikke har lavere temperatur enn romluften. Bevegelsesmengden i tilluften overgår oppdriftskreftene, og frisk tilluft vil kunne nå et større område i rommet enn ved vanlig fortregning med tilluftstilførsel ved lav hastighet (Chen et al. (2013)). Figur 2.4 illustrerer konseptet. Fordelene som oppnås ved konvensjonell fortreningsventilasjon gjelder også for fortregning med tilførsel av luft ovenfra.

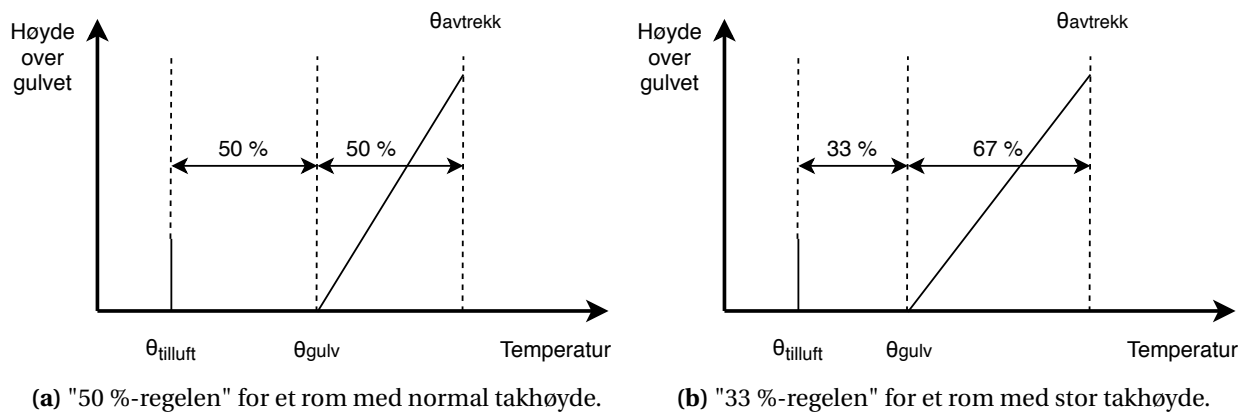
Fortreningsventilasjon i rom med stor takhøyde

I store rom, som industrihaller og ved skipsverft, og i idrettshaller og klatrehaller, vil luftens strømningsmønster domineres av konveksjonsstrømmer og lagdeling av romluften (Calay et al. (2000)). Avhengig av om et rom har kjølebehov eller oppvarmingsbehov kan lagdeling være nyttig eller en årsak til forhøyet energibehov. I en studie ble det beregnet at kraftig termisk lagdeling i en hangar forårsaket et økt energibehov til oppvarming på 38 % sammenlignet med hvordan situasjonen ville vært uten lagdeling (Saïd et al. (1996)). Motsatt kan det i rom med kjølebehov oppnås betydelige energibesparelser ved å utnytte termisk lagdeling og kun kjøle ned den nederste delen av rommet i rom med stor takhøyde, et prinsipp som har blitt utnyttet i industrielle ventilasjonsanlegg (Calay et al. (2000)).

I enkelte tilfeller når ikke den varme konveksjonsstrømmen helt opp til himlingen. Det dannes en positiv temperaturgradient i rom som ventileres ved fortregning, hvor gjennomsnittlig temperatur øker med høyde over gulvet. Dersom lufttemperaturen i konveksjonsstrømmen ved en viss høyde blir den samme som temperaturen i den omgivende luften vil oppdriften stoppe opp, og det vil dannes en "sky" av forurenset luft på denne høyden. En foreslått løsning i slike tilfeller er bruk av såkalte selektive avtrekk, hvor kun det horisontale laget med varm, forurenset luft trekkes ut. Klarer man å oppnå riktig plassering av et slikt avtrekk kan energibehov til kjøling reduseres betydelig, ettersom andelen varme fjernet per enhet luftmengde vil være høyere enn den ville vært med avtrekket plassert over eller under det forurensete

laget (Calay et al. (2000)). I mange tilfeller vil det i praksis være svært krevende å implementere et velfungerende selektivt avtrekk, ettersom behovet for oppvarming og kjøling, samt rommets temperaturgradient, varierer gjennom året, med varierende utetemperatur. Likevel kan prinsippet vurderes for rom med egnet utforming og bruksområde, eksempelvis en industrihall med høyt varmetilskudd og forurensning fra prosesser.

I alle rom utført med fortrenningsventilasjon vil det være en viss risiko for ubehag relatert til termisk lagdeling. Temperaturfordelingen vertikalt i et rom med fortrenningsventilasjon avhenger av plasseringen av varmekildene; varmekilder ved gulvet gir en større temperaturgradient ved gulvet og tilsvarende vil varmekilder høyt oppe gi en stor temperaturgradient der (Skistad et al. (2002)). Når målet er å kjøle ned oppholdssonen er fortrenningsventilasjon spesielt effektivt dersom varmekildene er plassert høyt oppe i rommet.

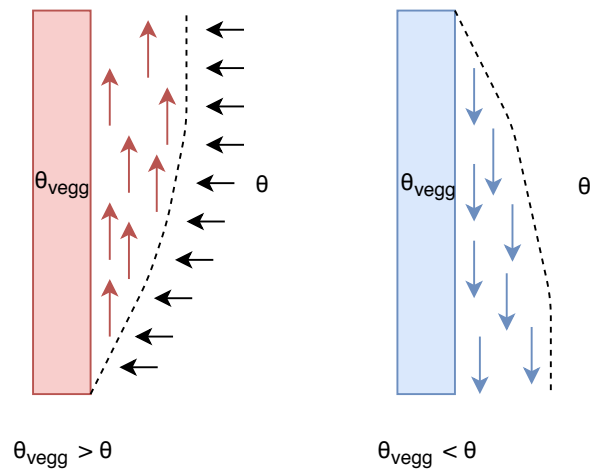


Figur 2.5: Vertikal temperaturfordeling ved fortrenningsventilasjon for et rom med normal takhøyde (figur 2.5a) og for et rom med stor takhøyde (figur 2.5b). Figurene er utarbeidet med inspirasjon fra Skistad et al. (2002).

I følge Skistad et al. (2002) kan man i mange praktiske tilfeller anta at temperaturfordelingen i rommet følger den såkalte "50 %-regelen", illustrert i figur 2.5a. 50 %-regelen sier at lufttemperaturen på gulvnivå vil ligge halvveis mellom temperaturen på tilluften og temperaturen på avtrekksluften. I figur 2.5 er θ_{tilluft} tilluftstemperatur, θ_{gulv} er lufttemperaturen på gulvnivå og θ_{avtrekk} er avtrekkstemperaturen. Som sagt kan regelen anvendes i mange tilfeller, men det viser seg at for rom med høyere takhøyde enn det som er normalt blir den unøyaktig. Økningen i temperatur fra tilluft til lufttemperatur ved gulvnivå er lavere for rom med stor takhøyde; en 33 %-regel, som illustrert i figur 2.5b, vil være mer passende for slike rom (Skistad et al. (2002)). Det vil si at en større andel av temperaturendringen fra tilluft til avtrekk skjer mellom gulvnivå og nivået rett under himlingen. Dette fører med seg økt risiko for at personer i rom med stor takhøyde kan ha en negativ termisk opplevelse av den vertikale temperaturgradienten.

Fortrenningsventilasjon baserer seg på oppdriftskraften i luft som er varmere enn den omsluttende luften, og på at kald luft som kommer i kontakt med varmekilder i rommet stiger opp rundt varmekilden. Det vil si at det oppstår en konveksjonsstrøm rundt varmekilden. Dermed vil kald luft som kommer i kontakt med varme vegger stige langs veggene. Denne effekten virker også motsatt; varm luft i kontakt med en kald flate, for eksempel et vindu, kjøles ned og synker ned langs flaten. Dette fenomenet er kjent

som kaldras, og er en vanlig årsak til klager på termisk komfort (Heiselberg (1994)). For å minske faren for ubehagelig trekk relatert til kaldras bør radiatorer plasseres under rommets kaldeste flater, som ofte vil være vinduer eller yttervegger. Konveksjon langs en varm og en kald vegg er illustrert i figur 2.6.



Figur 2.6: Konveksjon oppover langs en varm vegg, og nedover langs en kald vegg (kaldras). Figuren er utarbeidet med inspirasjon fra Skistad et al. (2002).

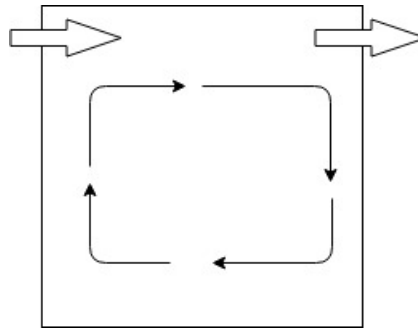
Jo lenger opp eller ned en slik konveksjonsstrøm beveger seg, jo mer luft dras inn i strømmen. Det betyr at for et rom med mye større takhøyde enn det som er normalt, vil fenomenet være mer merkbart, spesielt dersom rommet har kalde flater med stort areal.

2.2.3 Omrøringsventilasjon

Enkelte avsnitt i dette kapitlet er i hovedsak basert på stoff fra min prosjektoppgave "Ventilering av idrettsarealer i idrettsbygg for Sit", skrevet høsten 2018. Det er gjort tilføyelser og endringer i teksten.

Ved omrøringsventilasjon tilføres tilluften til rommet som luftstråler med høy hastighet. Prinsippet er at tilluftens hastighet er stor nok til at all luften i rommet settes i bevegelse, slik at romluften blandes med den rene tilluften. I en ideell situasjon oppnås fullstendig omrøring, hvor temperatur og konsentrasjon av luftforurensning er uniformt fordelt i rommet. I virkeligheten varierer luftens tilstand fra punkt til punkt i rommet.

Prinsippet med ventilering ved hjelp av omrøring kan forenklet illustreres som i figur 2.7. Luft tilføres gjennom en tilluftsventil og setter romluften i bevegelse slik at den blandes. En avtrekksventil trekker ut luft med omtrent samme temperatur og forurensningskonsentrasjon som i resten av rommet. I figuren er både tilluftsventil og avtrekksventil plassert øverst på rommets vegger. Ved omrøringsventilasjon har man større grad av frihet når det kommer til plassering av ventilene enn ved fortrenningsventilasjon, fordi luften har relativt lik sammensetning og temperatur over alt. Dermed risikerer man ikke å trekke ut ren tilluft dersom avtrekksventilen plasseres lavt i rommet, som ville vært tilfelle med fortrenning. Det må likevel tas hensyn til at lufthastigheten i nærheten av tilluftsventiler er høy, og disse bør derfor plasseres utenfor oppholdssonen. (Nilsson et al. (2003)) En studie som undersøkte konsentrasjoner av



Figur 2.7: Prinsippet bak omrøringsventilasjon. Luft tilføres rommet med høy nok hastighet til at den setter romluften i bevegelse. Avtrekksluften har samme sammensetning som romluften. Figur utarbeidet med inspirasjon fra Nilsson et al. (2003).

forurensning ved ulike plassering-er av tillufts- og avtrekksventiler ved omrøringsventilasjon, konkluderer med at plasseringen av avtrekksventilen har liten betydning på romluftens bevegelsesmønster, mens plasseringen av tilluftsventilen har større påvirkning (He et al. (2005)).

Ved fortreningsventilasjon kan man møte på utfordringer relatert til uønsket trekk. For omrøringsventilasjon er det i utgangspunktet lavere risiko dette, men systemet må likevel dimensjoneres med trekkproblematikk i bakhodet. I følge Nilsson et al. kan omrøringsventilasjon kun brukes så lenge interne varmelaster ikke overstiger 100 W/m^2 , dersom man skal holde lufthastigheten på et akseptabelt nivå (Nilsson et al. (2003)).

En klar ulempe ved omrøringsventilasjon er at luftkvaliteten i oppholdssonen ikke er like god som ved veldimensjonert fortrenning. Likevel kan omrøringsventilasjon betraktes som en mer fleksibel og praktisk løsning enn fortrenningsventilasjon, ettersom den gir muligheten for oppvarming ved hjelp av ventilasjonsluft. Dette er en av grunnene til at omrøringsventilasjon er den mest brukte løsningen for ventilering av skoler, barnehager og kontorbygg i Norge (Ingebrigtsen (2018a)).

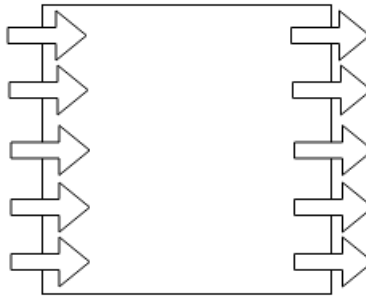
2.2.4 Stempelstrømventilasjon

Enkelte avsnitt i dette kapitlet er i hovedsak basert på stoff fra min prosjektoppgave "Ventilering av idrettsarealer i idrettsbygg for Sit", skrevet høsten 2018. Det er gjort tilføyelser og endringer i teksten.

I rom som har spesielt høye krav til luftkvalitet bør det vurderes å ta i bruk stempelstrømventilasjon. Dette kan gjelde for eksempel rom brukt til laboratoriearbeid eller operasjonssaler på sykehus. Prinsippet bak stempelstrømventilasjon er illustrert i figur 2.8. I figuren tilføres ren tilluft gjennom hele veggen til venstre. Luften beveger seg med jevn hastighet gjennom rommet, og trekkes ut gjennom hele veggen til høyre. Luftens bevegelse gjennom rommet kan sammenlignes med et stempels bevegelse gjennom et rør, derav navnet.

Tilluften kan også tilføres gjennom gulv eller himling, slik at man får en vertikal stempelstrømbevegelse enten oppover eller nedover.

Luft må tilføres ved høy hastighet for å oppnå uniform hastighetsprofil over tverrsnittet, og for å sikre at



Figur 2.8: Illustrasjon av prinsippet bak stempelstrømventilasjon. Luft tilføres ved høy hastighet gjennom en stor overflate, og "rensker" romluften. Figur utarbeidet med inspirasjon fra Nilsson et al. (2003).

luftstrømmen ikke endres i kontakt med varmekilder og forstyrrelser i rommet. Den store lufthastigheten fører til utfordringer relatert til termisk komfort på grunn av stor risiko for trekk, i tillegg til at både drifts- og investeringskostnader blir høye. Stempelstrømventilasjon er derfor en løsning som sjelden blir brukt, med mindre spesielle krav til luftkvalitet betinger det.

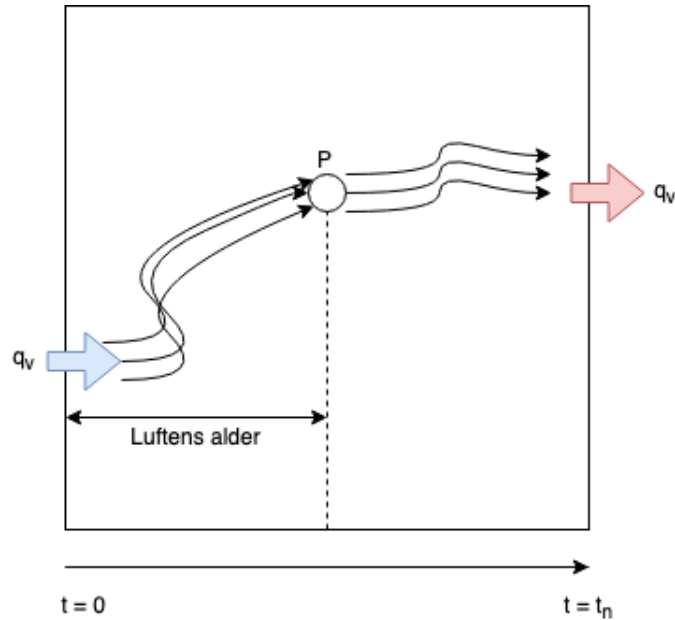
2.3 Ventilasjonseffektivitet

Et velfungerende ventilasjonsanlegg sørger for ren luft og riktig temperatur, og vil bidra til et sunt og behagelig innemiljø som fremmer produktivitet og trivsel. Det trengs metodikk og definisjoner for å kunne avgjøre hva som kan karakteriseres som et "velfungerende" anlegg. Dette kapitlet beskriver de vanligste konseptene og definisjonene brukt i vurderingen av et ventilasjonsanleggs evne til å sikre et godt innemiljø.

Ventilasjonseffektivitet er et begrep som omfatter flere ulike indekser som benyttes etter behov og ut ifra hvilken informasjon som foreligger. De ulike indeksene kan deles inn i to grupper; indeksene som beskriver anleggets evne til å skifte ut luften i rommet, og indekser som beskriver anleggets evne til å fjerne luftforurensning fra rommet (Mundt et al. (2004)). De følgende definisjonene vil presenteres, hvorav de to første beskriver hvor effektivt romluften skiftes ut, og de to påfølgende beskriver hvor effektivt luftforurensning fjernes:

- Luftsifteeffektivitet (air change efficiency), ε^a
- Lokal luftsifteindeks (local air change index), ε_p^a
- Forurensningsfjerningseffektivitet (Contaminant removal effectiveness – CRE), ε^c
- Lokal luftkvalitetsindeks (local air quality index), ε_p^c

Terminologien er hentet fra Mundt et al. (2004). I tillegg til de nevnte indeksene vil begrepet *luftens alder* presenteres. Hvilke indekser som best beskriver ventilasjonseffektiviteten til et anlegg avhenger av hvilken informasjon om forurensningskildenes plassering og egenskaper som foreligger. Dersom dette er ukjent egner indeksene for luftsifte seg best; motsatt vil luftkvalitetsindeksene egne seg best dersom forurensningskildenes plassering og egenskaper er kjent (Mundt et al. (2004)).



Figur 2.9: Illustrasjon av konseptet bak begrepet luftens alder. Hvert luftmolekyl i punkt P har tilbragt ulik mengde tid i rommet, og er i ulik grad forurenset av romluften. Luftens alder ved avtrekket er lik den nominelle tidskonstanten, τ_n . Illustrasjonen er utarbeidet med inspirasjon fra Mundt et al. (2004).

Sandberg (1981) definerer begrepet *luftens alder*, for et punkt i rommet, som den tiden som har gått siden luften i dette punktet kom inn i rommet. Tanken bak konseptet er at romluftens kvalitet sammenlignes med en situasjon hvor man har ideell omrøring. I et slikt tilfelle vil luften i ethvert punkt i rommet ha samme gjennomsnittlige alder; i en reell situasjon vil luftens alder variere mellom ulike punkter i rommet. Hvert luftmolekyl i et punkt har tilbrakt kortere eller lengre tid i rommet enn de andre molekylene i det samme punktet siden de ble tilført rommet som frisk tilluft (Skåret (2000)). Dermed har hvert av molekylene i ulik grad blitt forurenset av romluften. Luftkvaliteten i et gitt punkt kan måles i den lokale gjennomsnittlige luftalderen, betegnet med $\bar{\tau}_p$. Figur 2.9 illustrerer konseptet. I figuren betegner q_v luftmengden som tilføres og trekkes ut fra rommet og P betegner et vilkårlig punkt bestående av luftmolekyler med ulik alder. Luftens alder ved avtrekket er, som vist i figur 2.9, lik den nominelle tidskonstanten, τ_n (t_n i figuren). Den nominelle tidskonstanten for et rom finnes fra forholdet mellom rommets frie volum, gitt i m^3 , og luftmengden rommet ventileres med, gitt i m^3/t (Mundt et al. (2004)), se formel 2.4.

$$\tau_n[h] = \frac{V[m^3]}{q_v[m^3/h]} \quad (2.4)$$

Luftskifteeffektivitet, ε^a

Forholdet mellom den korteste mulige tiden det teoretisk kan ta å skifte ut luften i et rom og den faktiske luftskiftetiden gir luftskifteeffektiviteten, ε^a . Den teoretisk korteste mulige luftskiftetiden er den

nominelle tidskonstanten, τ_n . Uttrykket for luftskifteeffektivitet blir da som gitt i formel 2.5, hvor $\bar{\tau}_r$ er den faktiske luftskiftetiden. (Mundt et al. (2004))

$$\varepsilon^a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} * 100[\%] \quad (2.5)$$

Den teoretisk korteste mulige luftskiftetiden for et rom er kun mulig å oppnå ved stempelstrømventilasjon. Den faktiske luftskiftetiden, $\bar{\tau}_r$, tilsvarer to ganger romluftens gjennomsnittlige alder. Ved ideell stempelstrømventilasjon vil luftskifteeffektiviteten være 100 %, men for alle andre situasjoner, det vil si alle reelle situasjoner, vil effektiviteten være lavere enn 100 %. Ved omrøringsventilasjon kan ε^a maksimalt være 50 %. (Mundt et al. (2004)) Vanligvis anses et system med en luftskifteeffektivitet på over 40 % som akseptabelt (Karimipannah et al. (2000)).

Lokal luftskifteindeks, ε_p^a

I situasjoner hvor det er ønskelig å beskrive luftkvaliteten i et bestemt punkt i rommet brukes den lokale luftskifteindeksen, ε_p^a . Et slikt tilfelle kan for eksempel oppstå i et kontorrom, hvor en sittende person vil ha sin pustesone innenfor et relativt lite område i rommet. Uttrykket for lokal luftskifteindeks er gitt i formel 2.6. (Mundt et al. (2004))

$$\varepsilon_p^a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_p} * 100\% \quad (2.6)$$

I formel 2.6 er $\bar{\tau}_p$ luftens alder i punktet som ønskes undersøkt. Ved ideell omrøringsventilasjon oppnås en lokal luftskifteindeks på 100 %, ettersom luftens alder da vil være den samme på alle punkt i rommet. (Mundt et al. (2004))

Forurensningsfjerningseffektivitet, ε^c

Luftskifteeffektivitet og lokal luftskifteindeks beskriver hvorvidt utskiftningen av forurenset romluft skjer på en effektiv måte. Forurensningsfjerningseffektivitet (CRE) beskriver luftkvaliteten på bakgrunn av forurensning i luften, uavhengig av hvor lenge luften har vært i rommet. Uttrykket for CRE er gitt i formel 2.7,

$$\varepsilon^c = \frac{c_e}{\langle c \rangle} \quad (2.7)$$

hvor c_e er konsentrasjonen av en forurensningskomponent i luften som trekkes ut fra rommet gjennom avtrekksventilen, og $\langle c \rangle$ er den gjennomsnittlige forurensningskonsentrasjonen i rommet. CRE kan være

både lavere, lik og større enn 1, avhengig av ventilasjonsprinsipp og plasseringen til forurensningskildene. (Mundt et al. (2004))

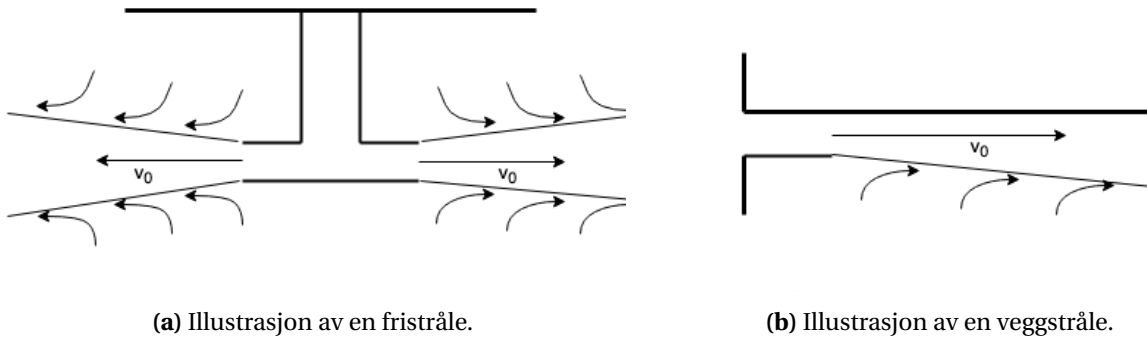
Lokal luftkvalitetsindeks, ε_p^c

På samme måte som den lokale luftskifteindeksen sier noe om luftens alder i et bestemt punkt, beskriver den lokale luftkvalitetsindeksen forurensningskonsentrasjonen i et bestemt punkt. Uttrykket i formel 2.8 gir lokal luftkvalitet, ε_p^c , som forholdet mellom c_e og forurensningskonsentrasjonen i punktet som undersøkes, c_p . (Mundt et al. (2004))

$$\varepsilon_p^c = \frac{c_e}{c_p} \quad (2.8)$$

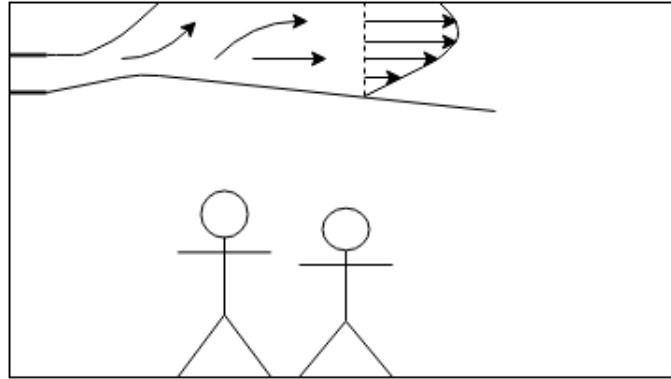
2.4 Luftbevegelser i ventilerte rom

I ventilasjonssystemer basert på omrøring må luft tilføres ved høy nok hastighet til at den setter romluften i bevegelse. Når luft blåses ut gjennom en åpning oppstår en luftstråle, hvis bevegelsesmønster, tverrsnittsareal og lufthastighet påvirkes av en rekke faktorer i omgivelsene. For tilluftsventiler beregnet til bruk i omrøringssystemer kan det skilles mellom frie luftstråler og veggstråler. En fri luftstråle oppstår når den tilførte luften ikke treffer overflater, som vegger, himling eller gulv, som påvirker strømningsmønsteret. Ved tilførsel av tilluft nært en himling eller en vegg virker overflaten inn på luftstrålens strømningsmønster helt fra utblåsningspunktet, og det oppstår en veggstråle. De to luftstrålekategoriene illustreres i figur 2.10.



Figur 2.10: Illustrasjon av en fristråle (figur 2.10a) og en veggstråle (figur 2.10b). Illustrasjonene er utarbeidet med inspirasjon fra Sørensen (1996).

Som illustrert med piler i figur 2.10 vil en luftstråle dra med seg luft fra omgivelsene, og dermed fører økende avstand fra startpunktet til økt luftmengde i strålen. Bevegelsesmengden for en isoterm luftstråle endres ikke etterhvert som luftstrålen beveger seg i horisontal retning. For en luftstråle som ikke er isoterm vil oppdrift påvirke bevegelsesmengden, men kun i vertikal retning. (Skåret (2000)) En luftstrålens horisontale utbredelse i rommet karakteriseres ofte ved kastelengde, definert som avstanden fra



Figur 2.11: Illustrasjon av Coanda-effekten på en luftstråle tilført nært himlingen. Effekten fører til at luften kleber seg til himlingen, og luftstrålens kastelengde forlenges med $\sqrt{2}$ sammenlignet med uten Coanda-effekten. Utarbeidet med inspirasjon fra Sørensen (1996).

innblåsningsåpningen til det punktet hvor strålens lufthastighet har sunket til et bestemt nivå, ofte 0,2 m/s (Sørensen (1996)). Ved prosjektering av tilluftstilførsel for et rom må kastelengden tilpasses slik at den verken blir for kort eller for lang. Ved for kort kastelengde risikeres det at rommet ikke vil ventileres i tilstrekkelig grad, og ved for stor kastelengde kan det oppstå problemer relatert til termisk komfort på grunn av trekk som følge av at luftstrålen treffer vegger eller andre overflater i for høy hastighet og dermed strømmer ned i rommet (Ingebrigtsen (2018a)). Bruk av kastelengde for tilluftsventiler er dermed et nyttig verktøy i prosjekteringsarbeid.

Når en luftstråle tilføres et rom i horisontal retning, med mindre enn 300 mm avstand fra himlingen, vil det øverste luftlaget i strålen feste seg til himlingsoverflaten (Ingebrigtsen (2018a)). Dette skjer som følge av Coanda-effekten, som får strømmende fluider til å feste seg til nærliggende overflater (van Hooff et al. (2012)). Effekten kan utnyttes i tilfeller hvor det er ønskelig å øke ventilens kastelengde for å sikre god omrøring av romluften eller for å unngå ubehag relatert til trekk. Et eksempel er vist i figur 2.11, hvor tilluft forsynes fra en ventil øverst på veggen til venstre, og det er ønskelig at luftstrålen når så langt som mulig ut i rommet før den synker til oppholdssonen. I slike tilfeller sørger Coanda-effekten for at luftstrålens kastelengde forlenges med $\sqrt{2}$ i forhold til hva den ville vært ved tilsvarende lufthastighet uten denne effekten (Sørensen (1996)).

Ofte har luft tilført et rom i form av en luftstråle en annen temperatur enn luften i rommet den tilføres. For ventilasjonssystemer som benyttes til oppvarming vil det alltid være tilfelle at tilluften har høyere temperatur enn romluften. Når luftstrålens temperatur avviker fra temperaturen på omgivende luft vil den i tillegg til treghetskrefter påvirkes av oppdrifts- eller tyngdekrefter. Forholdet mellom oppdriftskrefter og treghetskrefter i en luftstråle kan karakteriseres ved det dimensjonsløse Arkimedestallet, som beskriver hvor sterk påvirkningen fra oppdriftskreftene er. Arkimedestallet finnes som gitt i formel 2.9. (Skåret (2000))

$$Ar = \frac{gl\beta\Delta T}{U^2} \quad (2.9)$$

Hvor

- g = tyngdens akselerasjon
- l = karakteristisk lengde for strømmingen
- β = termisk volumutvidelseskoeffisient
- ΔT = karakteristisk temperaturdifferens
- U = karakteristisk hastighet

Arkimedestallet øker med økende avstand fra utblåsningsstedet. Det kan vises at forholdet er proporsjonalt med avstanden ganger kvadratroten av strålens tverrsnitt (Skåret (2000)). Tverrsnittet øker også med økende avstand, og dermed vil Arkimedestallet øke mer enn lineært ettersom den beveger seg bort fra utblåsningsstedet. Rent fysisk innebærer dette at oppdrifts- eller tyngdekraftenes påvirkning på en luftstråle tilført gjennom en tilluftsventil blir større med større avstand fra tilluftsventilen, og at strålen blir lettere og lettere (ved oppvarmet tilluft) eller tyngre og tyngre (ved kjølt tilluft). Skåret (2000)

2.5 Behovsstyring av ventilasjonssystemet

I kapittel 2.1 ble konseptet DCV så vidt introdusert. Dette kapitlet gir en nærmere beskrivelse av bakgrunnen for at DCV-systemer benyttes, og av hvordan disse kan utføres. Videre gis en kortfattet introduksjon til konseptet samtidighet for ventilasjonsanlegg.

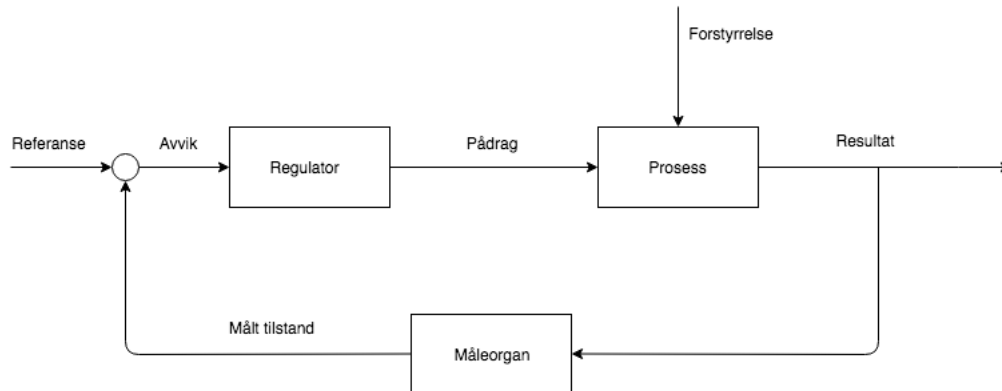
Enkelte avsnitt i dette kapitlet er i hovedsak basert på stoff fra min prosjektoppgave "Ventilering av idrettsarealer i idrettsbygg for Sit", skrevet høsten 2018. Det er gjort tilføyelser og endringer i teksten.

2.5.1 DCV-systemer - bakgrunn og regulering

DCV står for Demand Controlled Ventilation - behovsstyrt ventilasjon, og det er konseptet med å styre etter behov som ligger til grunn for ethvert DCV-system. Med DCV kan man oppnå et høyt komfortnivå uten at energibruken blir veldig høy, og denne gunstige kombinasjonen er grunnen til at nye ventilasjonssystemer ofte baseres på DCV. Behovsstyring av ventilasjonssystemet gir en lavere energibruk i løpet av et år sammenlignet med andre løsninger (Novakovic et al. (2007)). I prosjekteringen av et behovsstyrt anlegg vil en minimum- og en maksimum luftmengde for hver sone bestemmes. Når anlegget settes i drift vil luftmengden til hver sone kontinuerlig varieres trinnløst mellom de to ytterpunktene, for å til enhver tid tilfredsstille det gjeldende behovet. Det gjeldende behovet bestemmes på bakgrunn av målte verdier for en eller flere tilstandsindikatorer, og dermed er en forutsetning for DCV at indikatorene det skal styres etter er målbare (Ingebrigtsen (2018b)).

I DCV-systemer måles den valgte indikatoren, for eksempel temperatur eller CO₂-nivå, eller begge deler, av et måleorgan i rommet. Måleorganet sender et signal til en regulator, som sammenligner målingen

med ønsket verdi for tilstanden, og avgjør om luftmengden til rommet må økes, senkes eller holdes konstant. Regulatoren sender så et pådragssignal til systemets pådragsorgan. I et ventilasjonsanlegg vil pådragsorganet være spjeld plassert i tillufts- og avtrekkskanalene; i DCV-systemer kaller man spjeldene DCV-spjeld. DCV-spjeld regulerer mellom 0 % struping, det vil si helt åpent spjeld, til 100 % struping, det vil si helt lukket. Et slikt reguleringsystem hvor en regulert tilstand blir målt og sammenlignet med en ønsket tilstand, og et pådrag tilføres systemet på bakgrunn av avvik mellom målt og ønsket verdi, kalles en tilbakekoblet reguleringsløyfe (Balchen et al. (2003)). Et blokkdiagram som illustrerer måten en tilbakekoblet reguleringsløyfe fungerer på er presentert i figur 2.12.



Figur 2.12: Blokkdiagram for en tilbakekoblet reguleringsløyfe. Figuren er utarbeidet med inspirasjon fra Balchen et al. (2003).

Figuren viser de ulike størrelsene som har blitt forklart, og i tillegg er forstyrrelser inkludert. Forstyrrelser er påvirkninger fra omgivelsene som regulatoren i systemet ikke kan kontrollere (Balchen et al. (2003)). I et DCV-system vil en betydelig forstyrrelse være uteluftstemperaturen. I en enkel tilbakekoblet reguleringsløyfe, som den vist her, vet ikke regulatoren hvor kald eller varm friskluften utenfra er. For å oppnå raskere regulering kan en utendørs temperatursensor inkluderes i systemet, slik at når regulatoren avgjør hvilken luftmengde som skal tilføres rommet er pådraget bestemt på bakgrunn av både den målte tilstanden i rommet og forstyrrelsen. Kompensering basert på forstyrrelse kalles foroverkobling (Balchen et al. (2003)).

Det finnes flere ulike kontrollprinsipper som kan legges til grunn for utformingen av et DCV-system. Det vanligste er konstant-trykkregulering (Mysen and Schild (2014)), hvor viftehastighet-en varierer for å holde konstant statisk trykk i tillufts- og avtrekkskanalene. I et anlegg med konstant-trykkregulert DCV vil en trykksensor plassert kanalene måle lufttrykket kontinuerlig. Når strupingen i et DCV-spjeld endres vil også trykket i kanalen endres, og dette blir fanget opp av sensoren som sender signal til en regulator. Regulatoren sender et nytt signal til anleggets vifte, som tilpasser viftehastigheten slik at trykket i kanalen holdes konstant. Til tross for at dette er det vanligste prinsippet brukt i DCV-systemer er det ikke det mest energieffektive. Med denne typen kontroll vil spjeldene ofte strupes mer enn nødvendig, slik at energibruk til vifter blir tilsvarende unødvendig høy. (Mysen et al. (2014), Mysen and Schild (2014), Maripuu (2009))

Det mest energioptimale kontrollprinsippet er basert på at rommet som relativt sett krever høye-st luft-

mengde skal ha 0 % struping på spjeldet, det vil si at spjeldet er helt åpent. Rommet som relativt sett krever høyest luftmengde er det rommet som ligger lengst ute på den kritiske veien; veien i et kanalnett fra vifte til ventil som har høyest trykkfall. Den lengste veien i kanalnettet kan også være den kritiske, men den er ikke nødvendigvis det. Rommet skal få tilstrekkelig luftmengde med helt åpent spjeld; dersom regulatoren fortsetter å gi signal til DCV-spjeldet om å minske strupingen betyr det at luftmengden gjennom spjeldet er for lav. Dette prinsippet kalles spjeldoptimalisert regulering, og hensikten er å minimere energibruken til vifter. Så liten energibruk til vifter som mulig oppnås ved at den kritiske veien er helt åpen. (Mysen et al. (2014), Mysen and Schild (2014))

I tillegg til konstant-trykkregulering og spjeldoptimalisert regulering finnes det flere mindre brukte kontrollprinsipper for DCV-systemer. Blant annet er det mulig å anvende spesialutviklede tillufts-ventiler med innebygd DCV-funksjonalitet. Dette kan være en praktisk løsning dersom man har begrenset med plass, for eksempel i forbindelse med renovering av eldre bygninger. Det er også utført systemer hvor flere av prinsippene er satt sammen til en kombinert løsning.

2.5.2 Samtidighet

Ved dimensjonering av ventilasjonsanlegg med variable luftmengder er det viktig med tanke på reduksjon av energibruk å ta hensyn til samtidighetsfaktoren for systemet (Halvarsson (2012)). Samtidighetsfaktoren ble definert for bedre å kunne evaluere DCV-systemers energieffektivitet, og er gitt av forholdet mellom summert luftmengde over alle DCV-spjeld i anlegget og summert dimensjonerende maksimal luftmengde for alle DCV-spjeld i anlegget, se formel 2.10 (Mysen and Schild (2014)).

$$\text{Samtidighet} = \frac{\text{Summert luftmengde for alle DCV-spjeld}}{\text{Summert maksimal luftmengde for alle DCV-spjeld}} * 100 \% \quad (2.10)$$

Med andre ord sier samtidighetsfaktoren noe om hvor stor andel av kapasiteten til ventilasjonsanlegget som er i bruk i et gitt tidspunkt. Når kapasiteten til et ventilasjonsanlegg skal bestemmes må det vurderes hvorvidt det er sannsynlig at alle rom tilhørende anlegget vil ha maksimal belastning samtidig, det vil si 100 % samtidighet. Dersom dette ikke er sannsynlig, kan det være grunnlag for å neddimensjonere anlegget og dermed senke kostnader og minske fysisk plassbruk til kanaler. Det er viktig å ta i betraktning at dersom man velger å dimensjonere et anlegg for mindre enn 100 % samtidighet må man akseptere redusert luftkvalitet noen timer i løpet av året (Mathisen (2018)).

I mange bygninger vil enkelte rom stå tomme en stor andel av tiden, slik at den gjennomsnittlige samtidigheten for anlegget gjennom driftstiden er mye lavere enn 100 %. I tomme rom ventileres det med grunnventilasjon, det vil si ventileres kun for å fjerne materialeemisjoner. I bygninger med mange slike rom er det derfor viktig at anlegget har god virkningsgrad ved minimum luftmengde (Mysen and Schild (2014)). Det er denne luftmengden anlegget opererer ved i flest timer, og med dårlig virkningsgrad i den lavere enden av arbeidsområdet vil den totale virkningsgraden bli redusert.

Kapittel 3

Krav og belastninger i klatrehallen i Elgesetergate 10

I ethvert byggeprosjekt finnes det en rekke krav som må oppfylles. Alle bygg som oppføres i Norge i dag må oppfylle Byggteknisk forskrift (TEK17), som utgis av Direktoratet for byggkvalitet. Elgesetergate 10 skal i tillegg til TEK17 oppfylle krav for å kunne sertifiseres etter BREEAM-NOR med karakteren Excellent, samt nå ZEB (Zero Emission Building)-nivået ZEB-O÷EQ og prosjekteres og bygges som passivhus i henhold til NS 3701, "Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – Yrkesbygninger". Prosjektets byggherre, Statsbygg, forutsetter også at krav fremmet i enkelte spesifiserte veiledere fra Kulturdepartementet som et minimum legges til grunn for prosjektering og utføring av prosjektet. Kravene som må oppfylles kan i stor grad påvirke hvordan de tekniske løsningene blir utformet, og er derfor av betydning for denne oppgaven. Dette kapitlet presenterer relevante krav til inn klima og ventilasjonssystemet i klatrehallen, fra de nevnte instansene.

Enkelte avsnitt i de følgende delkapitlene er i hovedsak basert på stoff fra min prosjektoppgave "Ventilering av idretts-arealer i idrettsbygg for Sit", skrevet høsten 2018. Det er gjort tilføyelser og endringer i teksten.

3.1 Byggteknisk forskrift (TEK17)

Byggteknisk forskrift (TEK17) trådte i kraft 1. juli 2017, og erstattet dermed daværende TEK10 (Direktoratet for byggkvalitet (2017a)). Forskriften er omfattende og favner om et bredt spekter av fagområder. Dette delkapitlet trekker frem krav fra forskriften som anses å være spesielt relevante for denne oppgaven. Krav som angår utforming og prosjektering av ventilasjonssystemer finnes i forskriftens kapittel 13 (Inneklima og helse) og kapittel 14 (Energi).

3.1.1 Kapittel 13 - Inneklima og helse

I kapittel 13, første paragraf, stilles det krav om at (a) ventilasjon tilpasses rommets utforming, bruk og belastning, (b) at luftkvaliteten er tilfredsstillende med hensyn til lukt og (c) at luften ikke inneholder skadelige konsentrasjoner av forurensning (Direktoratet for byggkvalitet (2017c)). Rom beregnet for idrett, som denne oppgaven tar for seg, prosjekteres for å tåle høy bruk og belastning, og punkt (a) må derfor alltid ligge til grunn når løsninger velges. Punkt (b) handler om å hindre ubehagelig lukt, noe som også er svært relevant i rom hvor det foregår aktivitet med høy intensitet. Som beskrevet i kapittel 2.1.3 vil det i klatrehallen spesielt, men også i de andre idrettsrommene i bygningen, være forhøyet risiko for at konsentrasjonen av helseskadelig luftforurensning overgår anbefalte nivåer, og at man dermed bryter med punkt (c). Det må derfor tas spesielt hensyn til luftforurensning i valg av luftmengder og ventilasjonsstrategi.

Tredje paragraf av kapittel 13 i forskriften angir minimumsnivå for tilført luftmengde i byggverk for publikum og arbeidsbygninger. Grunnventilasjon settes her til minimum $2,5 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{m}^2)$ når rommet er i bruk, og minimum $0,7 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{m}^2)$ når rommet ikke er i bruk. Grunnventilasjon er den luftmengden som et rom til enhver tid skal ventileres med, slik at man sikrer at forurensning fra materialer fjernes. Luftmengdekravene i TEK17 forutsetter at materialene som er brukt i byggverket er lavemitterende. I tillegg til grunnventilasjon skal det ventileres med en luftmengde på $26 \text{ m}^3 / \text{t}$ per person i rommet i lett aktivitet. Personene som oppholder seg i klatrehallen vil i hovedsak ha et høyere aktivitetsnivå enn det som er vanlig for eksempel i kontorbygg eller undervisningsareal, og tilført luftmengde på grunn av personer må tilpasses dette.

Det siste leddet i tredje paragraf av kapittel 13 konstanterer at det må tas hensyn til aktiviteter og prosesser som genererer forurensning i rommet, og ved behov at luftmengden som trekkes ut tilpasses deretter. Som presentert i kapittel 2.1.3 vil klatreaktivitet generere store mengder støv, som må fjernes fra rommet for å minimere negative helseeffekter for de som oppholder seg der.

I § 13-6 Lyd og vibrasjoner setter forskriften krav til tilfredsstillende lydforhold i bygninger. Kravet omfatter også støy fra bygningstekniske installasjoner. Ventilasjonssystemet må dermed utformes på en slik måte at det ikke genererer støy utover det som aksepteres for å oppfylle lydklasse C i standarden NS 8175, "Lydforhold i bygninger – Lydklasser for ulike bygningstyper". For idrettsbygninger angir NS 8175 grenser på 35 dB og 37 dB for henholdsvis tidsmidlet lydtrykknivå og maksimalt lydtrykknivå (Standard Norge (2012b)). Støy fra ventilasjonsanlegg er relativt jevn, og vil være konstant så lenge luftmengden i anlegget er konstant. Lydkravet innebærer at anlegget ikke kan produsere støy over grensen på 35 dB over en periode hvor anlegget kjører med maksimal luftmengde.

3.1.2 Kapittel 14 - Energi

Byggteknisk forskrift, kapittel 14, stiller krav til energieffektivitet for ulike bygningskategorier. I § 14-2 angis maksimalt totalt netto energibehov for idrettsbygninger til $145 \text{ kWt} / \text{m}^2$ oppvarmet bruttoareal per år.

Energibruk til tekniske anlegg, og spesielt til ventilasjonsanlegg, utgjør en betydelig andel av det totale

energibruket i bygningen. I en utredning gjennomført av Rambøll i 2013 ble det slått fast at en av de mest effektive måtene å redusere energibruk i kontorbygninger på er energioptimal behovsstyrt ventilasjon (DCV), i tillegg til en reduksjon i spesifikk vifteeffekt (SFP) (Smits et al. (2013)). Det er fornuftig å anta at dette gjelder også for andre bygningskategorier, inkludert idrettsbygninger. Overholdelse av energikravet i forskriften fordrer dermed et ventilasjonsanlegg som er utformet og regulert på en slik måte at energibruken minimeres. Målet vil være å gjøre andelen av byggets totale netto energibehov som går til ventilering så liten som mulig. I arbeidet med denne oppgaven vil det ikke bli utført energiberegninger for hele bygningen, og en vurdering av hvorvidt kravet til maksimalt 145 kWt/m^2 overholdes vil derfor ikke bli gjort. Det relevante å ta med seg fra kapittel 14 i TEK17 er at det er ønskelig å oppnå en så lav energibruk til ventilasjon som mulig, og på den måten muligjøre en lavere total energibruk for bygningen.

3.2 Passivhusstandarden (NS 3701)

Kravene presentert i standarden NS 3701, "Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – Yrkesbygninger", skal oppfylles. For flerfunksjonsbygninger, som Elgesetergate 10 prosjekteres som, kan kriteriene i standarden benyttes til å prosjektere deler av bygningen, til tross for at kravene i standarden i utgangspunktet gjelder for hele bygninger (Standard Norge (2012a)). Derfor velges kravene for bygningskategorien "Idrettsbygning", selv om deler av bygningen hører til kategorien "Universitets- og høyskolebygning".

Standardens kapittel 4 angir overordnede kriterier. Krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming, hvor både romoppvarming og ventilasjonsvarme er inkludert, oppgis her. For en bygning hvor oppvarmet del av bruksareal er større enn 1000 m^2 kan kravet beregnes ut ifra uttrykket gjengitt i formel 3.1.

$$EP_{H,0} + K_1(6,3 - \theta_{\gamma,m}) \text{ [kWt/(m}^2\text{*år)]} \quad (3.1)$$

Hvor $EP_{H,0}$ er basis netto spesifikt oppvarmingsbehov i $\text{kWt/(m}^2\text{*år)}$, K_1 er en klimakoeffisient og $\theta_{\gamma,m}$ er årsmiddeltemperaturen. Dette uttrykket må brukes fordi årsmiddeltemperaturen i Trondheim er lavere enn $6,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (den er $5,8 \text{ }^\circ\text{C}$ Ifølge SINTEF Byggforsk (Kvande and Lisø (2012))). $EP_{H,0}$ og K_1 er gitt i standarden. For en idrettsbygning med passivhusstandard oppgis verdiene gjengitt i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Innndata til formel 3.1 for beregning av krav til energibehov til oppvarming, hentet fra NS 3701.

Bygningskategori	$EP_{H,0}$ [kWt/(m ² *år)]	K_1
Idrettsbygning	20	3,8

Innsatt i formel 3.1 resulterer det i en grense på $21,9 \text{ kWt/(m}^2\text{*år)}$. For å oppfylle byggherrens krav til passivhusstandard må altså netto spesifikt energibehov til romoppvarming og ventilasjonsvarme ikke overstige $21,9 \text{ kWt/(m}^2\text{*år)}$.

Det stilles videre krav til høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling. Standarden sier at "Bygningen skal utformes slik at termisk komfort oppnås med svært lavt energibehov til kjøling av romluft

og/eller tilluft." Når utelufttemperaturen overskrider dimensjonerende utetemperatur for sommer, godtas det avvik fra termisk komfort. For klimasteder hvor dimensjonerende utetemperatur for sommer er høyere enn 20,0 °C finnes kravet til høyeste spesifikke energibehov til kjøling fra uttrykket gitt i formel 3.2.

$$\beta(DUT_s - 20) \text{ [kWh/(m}^2\cdot\text{år)]} \quad (3.2)$$

Hvor β er en kjølebehovskoeffisient og DUT_s er dimensjonerende sommertemperatur. Kjølebehovskoeffisienten oppgis i standarden til å være lik 0,9 for idrettsbygninger prosjektert som passivhus. Dimensjonerende sommertemperatur oppgis å være den temperaturen som ikke overstiges mer enn 50 timer i året. En enkel dagssimulering for dimensjonerende sommertemperatur i energiberegningsprogrammet SIMIEN gir at DUT_s er 24,4 °C for klimastedet Trondheim. Med disse verdiene blir kravet til høyeste spesifikke energibehov til kjøling lik 3,96 kWh/(m²·år).

Videre krever standarden en årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner på minst 80 %, og en SFP-faktor for ventilasjonsanlegget på maksimalt 1,5 kWh/(m³·s). Det angis også hvilke verdier for internlast som skal benyttes ved energiberegning. For belysning skal det regnes med 5,5 W/m², og for utstyr 1,0 W/m². For personer angis verdien 10,0 W/m².

3.3 Føringer og krav fra offentlige instanser

I tillegg til kravene i Byggteknisk forskrift og normene fastsatt i standardene finnes det en del anbefalinger og krav til offentlige bygninger fra andre instanser.

3.3.1 Folkehelseinstituttets inneklimanormer

Rapporten "*Anbefalte faglige normer for inneklima – Revisjon av kunnskapsgrunnlag og normer*" ble utgitt av Nasjonalt folkehelseinstitutt (FHI) i 2015. Det er ikke lovpålagt å følge anbefalingene som gis i rapporten; den er ment å gi råd for hvordan lovpålagte bestemmelser (blant annet fra TEK17) kan oppfylles. (Nasjonalt folkehelseinstitutt (2015))

FHIs rapport tar for seg en lang rekke faktorer som kan forringe en bygnings inneklima. Anbefalingene som ansees å være mest relevante for klatrehallen i Elgesetergate 10 er de som omhandler temperatur, karbondioksid (CO₂), luftfuktighet og svevestøv. Anbefalte temperaturkrav hentes i rapporten fra standarden NS-EN ISO 7730, som sier at temperaturen innendørs om vinteren bør være i området 20,0 – 24,0 °C, og om sommeren i området 23,0 – 26,0 °C. Om relativ luftfuktighet sier FHI-rapporten at så lenge nivået holdes i området 20 % – 60 % har variasjoner lite å si for hvordan inneklimate oppleveres. Den anbefalte faglige normen for CO₂ er at maksimumverdien ikke overstiger 1000 ppm (parts per million – deler per million). Normerte grenseverdier for svevestøv i størrelsesfraksjonen 0 μm – 2,5 μm er allerede beskrevet i kapittel 2.1.3, men oppsummeres kort her: For 24 timers midlingstid anbefales en konsentrasjon på maksimalt 15 μg/m³, og for ett års midlingstid, 8 μg/m³.

3.3.2 Arbeidstilsynet: Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen

Arbeidstilsynets veiledning "Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen" (bestillingsnummer 444) er et støttedokument til Lov om arbeidsmiljø, arbeidstid og stillingsvern mv. (arbeidsmiljøloven). Veiledningen anbefaler at innelufttemperatur på arbeidsplasser holdes under 22,0 °C i månedene med oppvarmingsbehov, samt at lufthastigheten holdes under 0,15 m/s, for å kunne oppnå tilfredsstillende grad av termisk komfort. Anbefalingen gjelder for arbeidsplasser med fysisk lett aktivitet. Det forventes høyere aktivitet i klatrehallen, og temperaturkravet må derfor vurderes i lys av dette. Veilederen anbefaler samme minimumskrav til luftmengder som TEK17."

3.3.3 Veiledere fra Kulturdepartementet

Følgende veiledere fra Kulturdepartementet skal legges til grunn for prosjektering og utføring av prosjektet:

- *Idrettshaller. Planlegging og bygging (V-0989)*
- *Bestemmelser om tilskudd til anlegg for idrett og fysisk aktivitet (V-0732)*
- *Universell utforming av idretts- og nærmiljøanlegg (V-0511)*
- *Klatreanlegg – planlegging, bygging og drift (V-0974)*

Samtlige veiledere finnes tilgjengelig for nedlasting på nettsiden Regjeringen.no (Regjeringen (2018)). Veilederen "Bestemmelser om tilskudd til anlegg for idrett og fysisk aktivitet" inneholder kun rent administrative føringer for dokumentasjonsunderlag og for kriterier som må ligge til grunn for å kunne bruke spillemidler til å bygge og rehabilitere idrettsanlegg. Den er derfor ikke relevant for denne oppgaven. "Idrettshaller. Planlegging og bygging" omhandler flerbrukshaller, og er således heller ikke relevant. Veilederne som omhandler universell utforming og klatreanlegg inneholder enkelte relevante momenter. Disse vil presenteres i de følgende delkapitlene.

Universell utforming av idretts- og nærmiljøanlegg (V-0511)

Lov om forbud mot diskriminering på grunn av nedsatt funksjonsevne (diskriminerings- og tilgjengelighetsloven) fastslår i § 9 at "*Offentlig virksomhet skal arbeide aktivt og målrettet for å fremme universell utforming innenfor virksomheten*" (Lovdata (2005)). Regjeringens handlingsplan "Norge universelt utformet 2025" støtter opp om loven, og setter som prinsipp at "*[...] hovedløsningen i alle nyanskaffelser, nye bygninger og anlegg rettet mot allmennheten skal være universelt utformet*" (Barne- og likestillingsdepartementet (2009)). Dette er utgangspunktet for at det er satt frem krav om at Kulturdepartementets universell utforming-veileder skal følges i prosjektering og utføring av den nye flerbruksbygningen.

Veilederen omhandler i hovedsak føringer for konstruksjoner, atkomst, planløsning og lignende, men et av aspektene som må vurderes i planlegging av de tekniske anleggene er hensynet til personer med nedsatt hørselsevne. Ifølge veilederen har personer med nedsatt hørsel behov for gode akustiske forhold,

med liten eller begrenset bakgrunnsstøy. I deler av driftstiden kan det være behov for at store luftmengder tilføres klatrehallen for å sikre et tilfredsstillende inneklime, noe som kan medføre sjenerende støy for personer med nedsatt hørsel. Personer som oppholder seg i nærliggende rom kan også berøres av støy fra ventilasjonsanlegget, for eksempel i tilfeller hvor kanalførende sjakt har vegg mot to rom med ulike funksjoner.

Et annet sentralt aspekt når det gjelder utforming av tekniske anlegg og universell utforming er hensyn til personer med astma- og allergiplager. Som beskrevet i kapittel 2.1.3 er det forhøyet risiko for helseskadelige konsentrasjoner av støv og emisjonsprodukter i idrettsbygninger og spesielt i klatrehaller, og for personer som er utsatt for allergi eller overfølsomhet mot støv kan denne typen luftforurensning medføre ubehag ved å oppholde seg i lokalet. Det er essensielt å sikre at konsentrasjoner av partikler i inneluften er akseptable for alle brukergrupper.

Klatreanlegg – planlegging, bygging og drift (V-0974)

Kulturdepartementets veileder for klatreanlegg er utarbeidet med det formål å formidle kunnskap om bygging av gode og funksjonelle anlegg for klatreaktivitet, og gir en innføring i krav til klatrevegger og -ruter som gjelder for ulike standarder, samt sikkerhet ved klatring.

Anbefalingene fremsatt i veilederen som angår ventilasjonsanlegget er allerede dekket av kravene i TEK17 og arbeidsmiljøloven. Det oppgis at det av hensyn til funksjonshemmede som oppholder seg i rommet skal dimensjoneres for en innelufttemperatur på 22,0 °C, men at normal driftstemperatur er på 16,0 – 18,0 °C. Videre anbefales det at det i områder hvor klatrere er i aktivitet holdes en lav lufthastighet.

3.4 Building Research Establishment's Environmental Assessment Method (BREEAM)

Building Research Establishment's Environmental Assessment Method (BREEAM) er et miljøsertifiseringsverktøy for bygninger, hvor bygningers prestasjon i ulike såkalte bærekraftskategorier vurderes, og det utstedes et sertifikat på at bygningen har nådd et av sertifiseringsnivåene. BREEAM-nivåene som brukes i Norge er Pass, Good, Very Good, Excellent og Outstanding (Grønn Byggallianse (2018)). En tysk studie fra 2012 sammenligner ulike sertifiseringsverktøy. Den slår fast at BREEAM er det eldste og mest brukte sertifiseringsverktøyet, og det verktøyet som legger størst vekt på miljømessige hensyn i prosjekter, blant andre sammenlignbare aktører (Hamedani and Huber (2012)). Den samme studien beskriver bakgrunnen for at det oppsto et behov for å utvikle ulike sertifiseringsverktøy. I starten av 90-tallet ble konseptet "bærekraftig utvikling" stadig mer aktuelt, og det var nødvendig å utvikle strategier for å oppnå en bærekraftig utvikling av urbane områder. Med dette fulgte også et behov for å kunne vurdere tiltak som ble satt i verk, og innenfor bygningssektoren ble blant annet BREEAM lansert for å møte dette behovet. BREEAM ble først lansert i 1990 av bygningsforskningssenteret Building Research Establishment Ltd. (BRE), og er i dag i bruk i over 70 land (Grønn Byggallianse (2017)).

Elgesetergate 10 skal sertifiseres etter BREEAM-NOR, som er den gjeldende tilpasningen av BREEAM for den norske byggebransjen. Byggherren har satt krav om at bygningen skal oppnå karakteren "Excellent", det vil si det nest beste nivået. Dette kapitlet vil undersøke hvorvidt det foreligger krav som må møtes for å oppnå tilstrekkelig høy score, som angår utformingen av ventilasjonssystemet for klatrehallen.

3.4.1 BREEAM-NOR Teknisk manual - 2012

BREEAM-NOR – Teknisk manual", utgitt i 2012, er en standard eid av den ideelle organisasjonen Grønn Byggallianse. Standarden er offentlig tilgjengelig for informasjonsformål, men sertifisering av norske bygninger i henhold til BREEAM-standardene kan kun gjøres av personer som har gjennomført opplæring og innehar lisens fra Grønn Byggallianse (Grønn Byggallianse (2012)).

Statsbygg spesifiserer egne krav til minimum poengsum innenfor enkelte BREEAM-emner. Byggherrens kravspesifikasjon for Elgesetergate 10 ble utarbeidet på et tidspunkt da gjeldende BREEAM NOR-manual (2016-utgaven) ikke forelå. Kravene er derfor utarbeidet med utgangspunkt i manualen fra 2012, og inndeling av emner er endret betydelig fra 2012-manualen til 2016-manualen.

BREEAM-NOR – Teknisk manual fra 2012 er ikke lenger i bruk, og kravene som foreligger i den er dermed ikke relevante for dette prosjektet. For bygninger oppført fra og med 2016 må kravene i manualen utgitt i 2016 oppfylles for å oppnå den ønskede sertifiseringen.

3.4.2 BREEAM-NOR Teknisk manual - 2016

Den nyeste oversikten over BREEAM-kriterier finnes i standarden "BREEAM-NOR for nybygg 2016 - Teknisk manual". For å oppnå de ulike klassifiseringene må en angitt poengsum av et begrenset antall poeng oppnås innenfor hver av de ti kategoriene. Kategoriene som er relevante for utformingen av ventilasjonssystemet er i hovedsak "Helse og innemiljø" og "Energi". Hver av kategoriene er delt inn i emner, navngitt med konvensjonen "Hea 01", "Hea 02", osv. for kategorien Helse og innemiljø, og tilsvarende navngis emnene i kategorien Energi med "Ene 01", "Ene 02", osv. De ti kategoriene har ulik vektning i totalvurderingen som gjøres av bygningens prestasjon. Helse og innemiljø og Energi vektet med henholdsvis 15 % og 19 %, og er dermed de to kategoriene det legges størst vekt på. Alle kriteriene innenfor de relevante emnene vil ikke bli gjengitt her. I arbeidet med å oppnå BREEAM-sertifisering er enkelte kriterier obligatoriske, mens de fleste er valgfri så lenge den totale poengsummen er høy nok. Da vil noen kriterier bli valgt bort, og andre vil bli tillagt større viktighet.

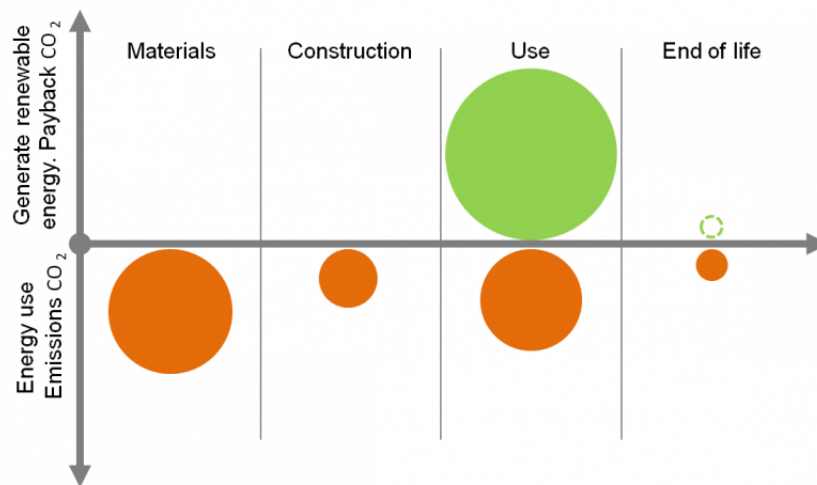
I kategorien Helse og innemiljø er emnene Hea 02 Inneluftkvalitet og Hea 03 Termisk miljø relevante. I Hea 02 handler et av kriteriene om plasseringen av ventilasjonssystemets inntak og avkast i forhold til hverandre. Formålet er å sikre at plasseringen av friskluftinntak velges slik at så lite luftforurensning som mulig slippes inn i bygningen. Et annet kriterie sier at det må installeres tilstrekkelig gode filtre i varme- og ventilasjonssystemet til at forurensning fra uteluften filtreres bort. Videre angis kriterier for blant annet sensorer, styring og regulering, og dokumentasjon av materialenes emisjonsegenskaper. Kategorien Energi har ingen emner som handler spesifikt om ventilasjonsanlegget, men handler mer generelt om å oppfordre til løsninger som senker bygningens totale energibehov.

3.5 Zero Emission Building (ZEB)

Elgesetergate 10 skal prosjekteres og bygges som et ZEB-O÷EQ-bygg. Ifølge SINTEF Byggforsk har dette ZEB-nivået følgende definisjon: *Bygningens fornybare energiproduksjon kompensere for klimagassutslippet fra energibruk i drift (O) av bygningen, med unntak av elektrisk utstyr, «plug loads» (EQ). "Plug loads" defineres som elektrisk utstyr som plugges i stikkontakter. (Dahl Schlanbusch and Lund Segtnan (2017))* I praksis innebærer dette at effektforbruk til ventilasjon og oppvarming skal dekkes ved hjelp av egenprodusert energi. For å verifisere at en bygning oppfyller ambisjonsnivå ZEB-O benyttes en metode for beregning av ZEB-balanse, eller utslippsbalanse. Uttrykket for ZEB- eller utslippsbalanse, ΔE_0 , er gitt i formel 3.3 (Dahl Schlanbusch and Lund Segtnan (2017)).

$$\Delta E_0 = \sum_{i=1}^n f(i) * (Q_u - Q_p) \quad [\text{kg CO}_2\text{-ekv./m}^2] \quad (3.3)$$

Hvor n er bygningens levetid i år, $f(i)$ er gjennomsnittlig årlig CO₂-faktor for år i , gitt i kg CO₂-ekvivalenter per kWt, Q_u er bygningens totale årlige energibruk, ikke fratrukket egenprodusert elektrisitet til eget bruk, og Q_p er bygningens totale årlige elektrisitetsproduksjon. Q_u og Q_p er gitt i kWt/år. Tabell 36 i den samme Byggforsk-anvisningen angir CO₂-faktor for energibærere (Dahl Schlanbusch and Lund Segtnan (2017)). Eksempelvis får elektrisitet fra strømmettet en faktor på 130 g CO₂-ekv./kWt, og søppelforbrenning til varme får 185 – 211 g CO₂-ekv./kWt. Figur 3.1 er en illustrasjon laget for å vise hvordan en bygnings produksjon av fornybar energi (den grønne sirkelen) veier opp for utslipp av drivhusgasser i de ulike fasene av bygningens levetid (The Research Centre on Zero Emission Buildings (2018)).



Figur 3.1: Grafisk illustrasjon av ZEB-definisjonen. Bygningens produksjon av fornybar energi (grønn sirkel) veier opp for utslipp av drivhusgasser i de ulike fasene av bygningens levetid. Figuren er gjengitt med tillatelse fra The Research Centre on Zero Emission Buildings.

Beregninger av bygningens totale årlige elektrisitetsproduksjon er utenfor omfanget av denne oppgaven. Hensyn til kravet om ZEB-O÷EQ-nivå tas ved å sikte mot et lavest mulig energibruk til ventilasjon, som

er den delen av bygningens energibruk oppgaven omhandler.

3.6 Kravspesifikasjon fra Statsbygg

I 2016 utarbeidet Statsbygg som byggherre, i samarbeid med Kunnskapsdepartementet, NTNUs daværende Fakultet for helse- og sosialvitenskap (FHS) og Studentsamskipnaden i Gjøvik, Ålesund og Trondheim (Sit) en kravspesifikasjon for byggeprosjektet, hvor krav til ytelser blir redegjort for. I kravspesifikasjonen legges kravene om BREEAM NOR-sertifisering, ZEB-O÷EQ-nivå samt oppnåelse av passivhusnivå frem. I tillegg presiseres krav til en rekke andre aspekter av byggeprosjektet. Enkelte av kravene er relevante for utformingen av ventilasjonsanlegget som skal forsyne klatrehallen, og disse vil bli presentert her.

Enkelte generelle føringer presenteres. Det ønskes at man unngår å plassere tekniske rom på taket, men at de heller plasseres i selve bygget. Det kreves at det settes av tilstrekkelig areal og volum i sjakter og over himlinger til at det blir enkelt å utføre blant annet vedlikehold, målinger og renhold i forbindelse med alle tekniske installasjoner, deriblant ventilasjonsanlegget. Kravspesifikasjonen inneholder i tillegg til generelle føringer et kapittel som omhandler VVS-installasjoner spesielt. Der angis enkelte konkrete og kvantitative føringer som må tas med i betraktningen ved utforming av ventilasjonsanlegget:

- *"Romklima skal tilfredsstilles både ved 20 % og 100 % belastning av intern varme. Dette gjelder både ved dimensjonerende sommer- og vinterforhold."*
- *"Rommene skal dimensjoneres for normal personbelastning oppgitt i RFP + 20 %. Dette betyr at hvis et rom har oppgitt en normal personbelastning på 100 personer, skal inneklimakrav også kunne oppnås ved en personbelastning på 120 personer (hele dagen). Dette inkluderer også avgitt varme fra teknisk utstyr, da dette i flere rom har sammenheng med personbelastningen."*
- *"Maksimal SFP ved dimensjonerende luftmengde skal være 1,5 kW/m³s."*

RFP står for "romfunksjonsprogram" i det andre punktet. Dette punktet er spesielt relevant for rom som kondisjonsareal og lignende, hvor det blant annet vil være tredemøller, ellipsemaskiner osv. som avgir varme når utstyret er i bruk. Bruk av slikt utstyr innebærer en økning i varmebelastning per person utover det personen selv tilfører. For klatrehallen vil dette være mindre relevant, ettersom utstyret brukt i forbindelse med klatring ikke avgir varme.

Et delkapittel av kravspesifikasjonen omhandler spesielle krav til ventilering av enkelte rom, og er særlig interessant for denne oppgaven. Det presiseres her at det vil bli brukt klatrekritt i klatresal og buldrerrom, og at ventilasjonsanlegget derfor må tilpasses det ekstra støvet dette forårsaker. Eventuelt må det vurderes hvorvidt det skal installeres eget ventilasjonsaggregat for klatrearealet, sier kravspesifikasjonen. Det skal også tas hensyn til ruter og overheng i planleggingen av ventilasjonsanlegget i klatresalen. Til slutt slås det fast at det må forutsettes et høyt aktivitetsnivå i samtlige idrettsarealer.

I innledningen til kapitlet om VVS-installasjoner vises det også til Arbeidstilsynets veiledning nr. 444 "Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen." Relevante krav fra denne veiledningen er presentert i kapittel 3.3.

3.7 Oppsummering av viktige krav

Elgesetergate 10 skal oppfylle krav fra Byggteknisk forskrift, standarden NS 3701, ulike veiledere utstedt av Kulturdepartementet, samt Statsbyggs egen kravspesifikasjon. Bygningen skal videre sertifiseres etter BREEAM-NOR med karakteren Excellent, og nå ZEB-nivået ZEB-O÷EQ. I tillegg bør relevante anbefalinger fra Arbeidstilsynet og Nasjonalt folkehelseinstitutt følges. Krav og anbefalinger fra de ulike instansene som er vurdert å være relevante for denne oppgaven oppsummeres i tabell 3.2.

3.8 Personbelastning

Kravspesifikasjonen utarbeidet av Statsbygg, NTNU-FHS og Sit angir at det forventes at 2000 personer vil benytte seg av treningsarealene til daglig. Antall studenter totalt er også 2000, og antall ansatte er 237. Denne oppgaven tar kun for seg klatrehallen, og belastningen på bygningen som helhet vil derfor ikke være relevant. Forventet personbelastning er likevel interessant å inkludere med tanke på fremtidig utvidelse av arbeidet som gjøres her, og for å få et inntrykk av hvilket omfang bygningen skal brukes i.

Romfunksjonsprogrammet oppgir en forventet normal personbelastning i klatrehallen på 50 personer. Det er ikke kjent om dette tallet har blitt endret i senere faser av prosjekteringen. I henhold til kravene fra kravspesifikasjonen må rommet dimensjoneres for 50 personer + 20 %, det vil si for 60 personer. I enkelte av rommene i idrettsbygningen vil personbelastning ha stor betydning for kjølebehovet. Dette gjelder rom hvor det holdes et høyt aktivitetsnivå, og hvor det er mange personer tilstede i et relativt sett lite rom, eksempelvis i spinningsalen. I klatrehallen vil personbelastningen ha mindre betydning, ettersom romvolumet er stort og varmetilskudd fra hver enkelt person ikke bidrar til å varme opp rommet i betydelig grad.

Tabell 3.2: Oppsummering av krav fra TEK17, standarden NS 3701 samt offentlige instanser og byggherren som relevans for utformingen av ventilasjonsanlegget i Elgesetergate 10.

Forskrift/standard:	Kategori	Krav
TEK17, kapittel 13	Generelle føringer Generelle føringer Generelle føringer Grunnventilasjon, i bruk Grunnventilasjon, ikke i bruk Luftmengde per person i lett aktivitet Maksimalt tidsmidlet lydnivå	Ventilasjon tilpasses rommets utforming, bruk og belastning Tilfredsstillende luftkvalitet (lukt) Tilfredsstillende luftkvalitet (luftforurensning) $2,5 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{m}^2)$ $0,7 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{m}^2)$ $26 \text{ m}^3 / \text{t}$ 35 dB
TEK17, kapittel 14	Maksimalt totalt netto energibehov	$145 \text{ kWt} / \text{m}^2$
NS 3701	Energibehov til oppvarming Energibehov til kjøling Temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner SFP-faktor Internlast til belysning Internlast til utstyr	$21,9 \text{ kWt} / (\text{m}^2 \cdot \text{år})$ $3,96 \text{ kWt} / (\text{m}^2 \cdot \text{år})$ $> 80 \%$ $< 1,5 \text{ kW} / (\text{m}^3 / \text{s})$ $5,5 \text{ W} / \text{m}^2$ $1,0 \text{ W} / \text{m}^2$
FHI	Lufttemperatur Relativ luftfuktighet CO ₂ PM _{2,5}	$20,0 \text{ °C} - 24,0 \text{ °C}$ (vinter) $23,0 \text{ °C} - 26,0 \text{ °C}$ (sommer) $20 \% - 60 \%$ $< 1000 \text{ ppm}$ $15 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (24 timers midlingstid) $8 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (1 års midlingstid)
Arbeidstilsynet	Lufttemperatur Lufthastighet	$< 22,0 \text{ °C}$ $< 0,15 \text{ m} / \text{s}$
Kravspesifikasjon (Statsbygg)	Generelle føringer Maksimal SFP-faktor	Rommene skal dimensjoneres for normal personbelastning oppgitt i RFP + 20 %. $1,5 \text{ kW} / (\text{m}^3 / \text{s})$

Kapittel 4

Målinger og spørreundersøkelse

Dette kapitlet beskriver fremgangsmåte for luftmålingene utført i to innendørs klatreanlegg i Trondheim; Trondheim Klatresenter og klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Hvilke luftkvalitetsindikatorer som er blitt målt, hvilket måleutstyr som er benyttet, samt plassering av måleapparatene i lokalene beskrives. På Dragvoll har det blitt utført en spørreundersøkelse om inneklima; fremgangsmåte for gjennomføring av undersøkelsen presenteres.

Kapitlet inneholder videre kritiske evalueringer av fremgangsmåtene som er benyttet. Forenklinger, antagelser og unøyaktighet kan være kilder til feil og usikkerhet i resultatene det er kommet frem til, og en gjennomgang av de viktigste feilkildene presenteres.

4.1 Målinger av luftkvalitet i Trondheim Klatresenter

Som et ledd i arbeidet med å besvare denne oppgavens problemstillinger er det blitt utført målinger av lufttemperatur, CO₂-konsentrasjon, relativ luftfuktighet og partikkelkonsentrasjon i klatreanlegget Trondheim Klatresenter. Målingene ble igangsatt den 21. februar 2019. De fleste målingene ble avsluttet den 22. februar, mens fem temperatursensorer ble programmert til å fortsatte målingene i tre uker, frem til den 15. mars 2019. Enkelte målinger ble utført i samarbeid med Jørgen Tonning Buch og Simen Jensås, som i vår leverer sin bacheloroppgave omhandlende filter i avtrekk i idrettsbygninger ved Institutt for energi- og prosesssteknikk ved NTNU.

4.1.1 Beskrivelse av ventilasjonsanlegget i Trondheim Klatresenter

Trondheim Klatresenter ligger i Falkenborgveien øst i Trondheim, og er med omtrent 85 000 årlige besøkende et av landets største senter for buldring, det vil si klatring uten sikring. Senteret er bygget opp i en gammel lagerbygning, opprinnelig oppført på 1970-tallet. Trondheim Klatresenter flyttet inn i bygningen i 2013, og overtok lokalet etter meieriproduktleverandøren TINE. På dette tidspunktet ble overskuddsvarme fra kjølelager benyttet i ventilasjonsanlegget. Behovet for et nytt anlegg for ventilasjon og op-

pvarming ble innfridd i 2014; da ble et nytt anlegg basert på prinsippet med omrøringsventilasjon og oppvarming med varmebatteri installert. Ventilasjonsaggregatet står åpent i rommet, og tilluftskanalene fordeles derfra og ut i lokalet. Anlegget har sentralt avtrekk direkte inn i aggregatet, som vist i figur 4.1b. Tilluften forsynes gjennom kanalåpninger med mindre diameter enn hovedkanalen, slik at luften tilføres rommet i stor hastighet. Den tilførte luften fra hver kanalåpning fungerer dermed som en luftstråle, som setter romluften i bevegelse. En slik åpning i en tilluftskanal er vist i figur 4.1a. Ventilasjonsaggregatet, med sentralt avtrekk, er plassert på en hems omtrent seks meter over gulvnivå. Tilluftskanalene med ventiler står omtrent fem meter over gulvnivå. Ventilene for avkast og inntak, koblingene mellom ventilasjonsaggregatet og uteluften, er avbildet i figur 4.2.

På tidspunktet luftmålingene i klatreanlegget ble gjennomført ble ventilasjonsanlegget driftet på om-luft det meste av døgnet, det vil si at romluften sirkulerer uten tilførsel av friskluft utenfra. Tilførsel av friskluft til lokalet hadde man kun mellom klokken 18:00 og klokken 21:00, i perioden med høyest aktivitet. Settpunktet for tilluftstemperatur styres manuelt etter behov og etter værvarsel, og holdes i vintermånedene som regel på 25,0 °C. Luftmengden var senket til et lavt nivå gjennom natten mellom den 21. og den 22. februar, og ble økt til vanlig drift igjen klokken 05:00 den 22. februar.



(a) Kanalåpning for tilluft.

(b) Sentralt avtrekk.

Figur 4.1: Tillufts- og avtrekksventilene i ventilasjonsanlegget i Trondheim Klatresenter. Bildene er tatt 21. februar 2019 i forbindelse med luftmålinger i lokalet.

Luftmengder

Luftmengden ventilasjonsanlegget distribuerer til enhver tid styres av settpunktet for trykk over tilluftsviften. Dermed innstilles ikke aggregatet til å levere en bestemt prosjektert luftmengde; en økning i luftmengde følger av en økning i trykk, og tilsvarende for en reduksjon i trykk og luftmengde. For å kunne vurdere hvor effektivt ventilasjonsanlegget er vil det være nyttig å vite hvilken luftmengde som benyttes.

Ved kjent tverrsnittsareal på kanal, og målt lufthastighet, kan luftmengden gjennom tilluftskanalen beregnes ved hjelp av uttrykket i formel 4.1.

$$\dot{V} [\text{m}^3/\text{t}] = v [\text{m}/\text{s}] * 3600 [\text{s}/\text{t}] * \pi * \frac{d^2}{4} [\text{m}^2] \quad (4.1)$$



Figur 4.2: Ventiler for avkast og inntak av luft til ventilasjonsaggregatet i Trondheim Klatresenter. Avkast er plassert til venstre; inntaksrist til høyre. Foto: Jørgen Tonning Buch.

Terje Wenaas ved Institutt for energi- og prosesseteknikk ved NTNU utførte enkle målinger av lufthastighet i tilluftskanalen ut fra ventilasjonsaggregatet. Målingene ble utført i forbindelse, og samtidig med, målingene utført av Buch og Jensås, samt målingene utført i forbindelse med denne oppgaven. Tabell 4.1 viser målt lufthastighet, i m/s, i en tilluftskanal med tverrsnittsdiameter på 800 mm, samt den resulterende luftmengden, gitt i m³/t.

Tabell 4.1: Målt lufthastighet i tilluftskanal (Ø800) ut fra aggregatet, samt resulterende luftmengde gjennom kanalen. Verdiene for luftmengder er avrundet.

Trykk [Pa]	Lufthastighet [m/s]	Luftmengde [m ³ /t]
80	4,5 – 4,8	8 100 – 8 700
180	7,0 – 7,5	12 700 – 13 600

Lufthastighetsmålingen kan ikke regnes som helt nøyaktig, men de beregnede luftmengdene kan brukes som en god indikasjon på hva den reelle luftmengden i anlegget vil være.

4.1.2 Måleutstyr benyttet i Trondheim Klatresenter

Det følgende måleutstyret er benyttet i forbindelse med luftmålingene i Trondheim Klatresenter:

- iButton[®], Maxim Integrated
- C.A 1510 ambient air tester, Chauvin Arnoux
- Pegasor AQ Indoor[™], Pegasor
- AEROTRAK Handheld Particle Counter, TSI
- CP11 - Handheld instrument for CO₂, humidity and temperature, Rotronic Measurement Solutions

I forkant av luftmålingene ble det gjennomført tester av enkelte av måleapparatene som er benyttet. En beskrivelse av hvordan dette ble gjennomført, samt resultatet av testene, er gitt i vedlegg A.

4.1.3 Utførelse av luftmålinger i Trondheim Klatresenter

Målingene av luftkvalitet og -temperatur i Trondheim Klatresenter ble startet opp torsdag 21. februar, og avsluttet fredag 22. februar. Utetemperaturen i perioden målingene ble utført lå i området 0,0 °C – 2,0 °C. Den aktuelle uken var det vinterferie for grunnskolene i Trøndelag, og som et resultat av dette var personbelastningen i senteret på dagtid noe høyere enn normalt. Ettermiddagsbelastningen var normal.

I forkant av luftmålingene ble det gjennomført en risikoanalyse, ettersom plasseringen av enkelte sensorer var rundt syv meter over gulvnivå. Risikoanalysen er presentert i vedlegg F.

Temperaturmåling med *iButtons*

Temperaturfordelingen vertikalt i rommet kan ha betydning for både termisk komfort og energibruk til oppvarming, og er således interessant å undersøke. Luftsjiktet langs klatreveggene kan delvis betraktes som oppholdssone, ettersom personene som oppholder seg på senteret tilbringer en andel av tiden i dette området. Som en del av undersøkelsene i Trondheim Klatresenter ble det plassert ut 16 *iButtons* på en av klatreveggene i senteret. Den valgte plasseringen er sentralt i rommet, omtrent midtveis mellom tilluftsforsyning og den bakre veggen. Plasseringen er valgt med mål om å unngå forstyrrelser i form av trekk og stråling. Sensorene ble plassert fra toppen til bunnen av veggen, med et mellomrom mellom hver sensor på 50 cm.

I tillegg til temperaturmålingene vertikalt langs en klatrevegg ble det plassert tre *iButtons* i ventilasjonsaggregatet; én rett før tilluftskanalen, én i avtrekkskammeret og én i kammeret for friskluftinntak. Til slutt ble det satt ut én *iButton* utendørs, plassert slik at den var skjermet for forstyrrelser fra vind og sollys. Plasseringen av *iButtons* i den første delen av forsøket er oppsummert i tabell 4.2.

I den første delen av temperaturmålingene ble alle sensorene programmert til å starte registrering av temperatur omtrent klokken 12:00, torsdag 21. februar. Det var utfordrende å oppnå nøyaktig lik start for alle sensorene, ettersom grensesnittet kun gir mulighet for å angi antall minutter til oppstart. Sensorene ble programmert til å registrere temperatur med en frekvens på én måling per 300 sekunder, det vil si hvert femte minutt.

Den første delen av temperaturmålingene ble avsluttet fredag 22. februar klokken 09:30. Alle sensorene ble samlet inn, og måledata ble registrert. Fem nye *iButtons* ble programmert til å gjøre videre målinger i klatresenteret over en lengre periode. Disse ble plassert i tilluftskanal, avtrekkskanal, kanal for friskluftinntak, utendørs og i oppholdssonen innendørs. Oppstart for målingene ble satt til 22. februar klokken 10:30, og målefrekvens ble satt til én måling per 900 sekunder, det vil si hvert 15. minutt. Langtidsmålingene ble avsluttet 15. mars klokken 08:00. Tabell 4.3 oppsummerer plasseringen av *iButtons* brukt til langtidsmålinger av temperatur.

Tabell 4.2: Plassering av *iButtons* i den første delen av undersøkelsene av luftkvalitet og -temperatur i Trondheim Klatresenter, 21. – 22. februar 2019.

<i>iButton</i> nr.	Plassering	Høyde over gulvet [m]
1	Tilluftskanal	-
2	Avtrekkskanal	-
3	Friskluftinntak	-
4	Utendørs	-
5	Klatrevegg	0
6	Klatrevegg	0,5
7	Klatrevegg	1
8	Klatrevegg	1,5
9	Klatrevegg	2
10	Klatrevegg	2,5
11	Klatrevegg	3
12	Klatrevegg	3,5
13	Klatrevegg	4
15	Klatrevegg	4,5
16	Klatrevegg	5
17	Klatrevegg	5,5
18	Klatrevegg	6
19	Klatrevegg	6,5
20	Klatrevegg	7
21	Klatrevegg	7,5

Tabell 4.3: Plassering av *iButtons* til langtidsmålinger av temperatur i Trondheim Klatresenter, 22. februar – 15. mars 2019.

<i>iButton</i> nr.	Plassering
22	Tilluftskanal
23	Avtrekkskanal
24	Friskluftinntak
25	Utendørs
26	Buldrevegg (oppholdssone)

Målinger av lufttemperatur, CO₂-konsentrasjon og relativ luftfuktighet

Det ble benyttet seks måleinstrumenter av typen *C.A 1510 ambient air tester* fra Chauvin Arnoux i utføringen av luftmålingene i Trondheim Klatresenter. målerne registrerer tre indikatorer for inneluftkvalitet; lufttemperatur, CO₂-konsentrasjon og relativ luftfuktighet. Måleinstrumentenes plassering i klatresenteret ble valgt med mål om å kartlegge luftkvaliteten i ulike deler av senterets oppholdssone på bakkenivå. I tabell 4.4 oppgis plasseringen av målerne, samt høyde over gulvet. Plasseringen illustreres også i figur 4.3. Alle målerne ble programmert til å logge måledata hvert femte minutt.

Som det fremgår av tabellen ble måleren CA1 plassert i klatresenterets styrkeområde, hvor klatrere kan

Tabell 4.4: Plassering av *C.A 1510 ambient air tester*-målere i den første delen av undersøkelsene av luftkvalitet og -temperatur i Trondheim Klatresenter, 21. – 22. februar 2019.

Navn	Plassering	Høyde over gulvet [m]
CA1	Styrkeområde	1,56
CA2	Bakerste buldrevegg	0,86
CA3	Ved sentralt avtrekk	6,0
CA4	Klatrevegg	1,65
CA5	I "grotte"	2,0
CA6	Lavt på buldrevegg	1,1

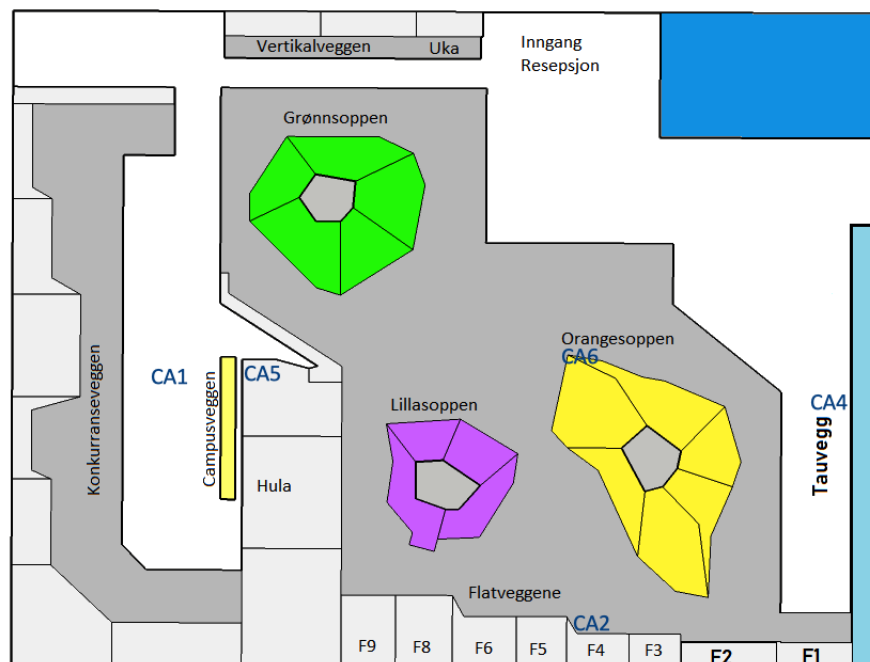
benytte seg av diverse apparater for styrketrening. Måleren ble festet til et av apparatene. Videre ble målerne CA2, CA4, CA5 og CA6 plassert direkte på buldre- eller klatrevegger på ulike lokasjoner i lokalet. CA2 gjorde målinger på et punkt langt unna tilluftsventilene; CA6 ble plassert på en vegg nært ventilene, hvor luftkvaliteten antas å være god. CA4 ble plassert på samme klatrevegg som *iButton*-sensorene, og en sammenligning av temperaturmålingene fra CA4 og de nærmeste *iButton*-sensorene kan avdekke eventuelle målefeil. Utformingen av klatresenteret kan føre til at enkelte områder får dårligere luft sirkulasjon enn det som er ønskelig. Dette gjelder spesielt områder utformet som "grotter", hvor det er mulig å klatre både på veggen og i overhengende himling. Bildet i figur 4.4 viser plasseringen av måleren CA5 i en av disse grottene. I figuren er måleren markert med gult, og tilluftsventilene som forsyner denne delen av lokalet merket med blått. Den siste *C.A 1510*-måleren, CA3, registrerte temperatur, CO₂-nivå og luftfuktighet ved anleggets sentrale avtrekk. Figur 4.3 viser en enkel plantegning over lokalet. Plasseringen av alle målerne, bortsett fra CA3, er merket i figuren med blått. CA3 var plassert ved anleggets sentrale avtrekk utenfor tegningen.

Som nevnt innledningsvis i dette kapittelet er det utført enkelte målinger i samarbeid med Jørgen Tønning Buch og Simen Jensås. Buch og Jensås utførte målinger av CO₂-konsentrasjon på tre ulike lokasjoner, og på to ulike tidspunkt. De valgte målepunktene var rett før avtrekket på ventilasjonsaggregatet, i tilluftskanalen og utendørs. De første målingene ble gjort ved omluftsdrift, og de siste mens anlegget opererte med frisklufttilførsel. Måleapparatet som ble benyttet var *CP11 - Handheld instrument for CO2, humidity and temperature* fra Rotronic Measurement Solutions.

Måling av svevestøvkonsentrasjon

Et måleinstrument av typen *Pegasor AQ Indoor*TM fra den finske produsenten Pegasor ble brukt til å måle og logge konsentrasjoner av svevestøv i klatresenteret. Instrumentet måler partikkeltall, partikkeloverflateareal, partikkelmasse og partikkeloverflateareal som havner i lungene (Lung Deposited Surface Area of Particles – LDSA) (Pegasor (2019)). I tillegg måles CO₂-konsentrasjon, temperatur og relativ luftfuktighet.

Pegasor-enheten ble plassert i resepsjonsområdet av klatresenteret, og utførte luftmålinger fra klokken 10:30 den 21. februar til klokken 08:30 den 22. februar. Valg av plassering var basert både på et ønske om



Figur 4.3: Plassering av C.A 1510-målerne CA1, CA2, CA4, CA5 og CA6 i lokalet til Trondheim Klatresenter. Måleren CA3 var plassert ved anleggets sentrale avtrekk utenfor tegningen. Hver målers plassering er markert med blå skrift.



Figur 4.4: Plasseringen av måleren CA5 (merket med gult), i en av lokalets "grotter". Blå markering viser de nærmeste tilluftsventilene. Bildet er tatt 21. februar i forbindelse med luftmålinger i lokalet.

å overvåke luftkvaliteten i arbeidsområdet til senterets ansatte, og et praktisk hensyn. Det er til tider svært høyt aktivitetsnivå i klatresenteret, og måleinstrumentet er kostbart. Det ble vurdert at det var fornuftig å unngå unødvendig eksponering for eksempelvis velting eller andre uhell.

Buch og Jensås utførte også målinger av partikkelkonsentrasjoner på ulike lokasjoner i klatreanlegget. Apparatet som ble benyttet var av typen *AEROTRAK Particle counter* fra den amerikanske produsenten TSI Incorporated. Det ble gjort målinger ved tre ulike målepunkter; midt foran den samme klatreveggen som hvor det ble målt temperatur ved hjelp av *iButtons*, midt i oppholdsområdet av senteret, i styrkedelen av senteret og til slutt utendørs.

Buch og Jensås utførte målinger ved å la apparatet registrere partikkelantall i ett minutt, for så å notere gjennomsnittet av målingene. Prosedyren ble utført én gang mens ventilasjonsanlegget var innstilt på drift med omluft, fra klokken 11:20, og én gang i normal drift, fra klokken 18:50. Se tabell E.1 i vedlegg E for oppsummert oversikt over tidspunkt for målinger. Partikkelmålinger ble utført for partikler i ulike størrelsesfraksjoner på hvert av målepunktene. Størrelsesfraksjonene apparatet måler er de følgende, hvor d er partikkelens aerodynamiske diameter:

- $0,3 \mu\text{m}$: $d < 0,3 \mu\text{m}$
- $0,5 \mu\text{m}$: $0,3 \leq d < 0,5 \mu\text{m}$
- $1 \mu\text{m}$: $0,5 \leq d < 1 \mu\text{m}$
- $3 \mu\text{m}$: $1 \leq d < 3 \mu\text{m}$
- $5 \mu\text{m}$: $3 \leq d < 5 \mu\text{m}$
- $10 \mu\text{m}$: $5 \leq d < 10 \mu\text{m}$

4.2 Målinger av luftkvalitet på Dragvoll idrettssenter

Trondheim Klatresenter er et stort lokale, oppdelt i flere soner og rom, og utformingen er ulik fra den planlagte utformingen av klatrehallen i Elgesetergate 10. Med tanke på å få et bedre grunnlag for å kunne si noe om mulige utfordringer med hensyn til inneluftkvalitet i den planlagte klatrehallen vurderes det å være nyttig å gjøre luftmålinger i et lokale som ligner mer på det som skal bygges. Klatrehallen på Dragvoll idrettssenter er valgt til dette formålet. Det er gjort målinger av lufttemperatur, CO_2 -konsentrasjon, relativ luftfuktighet og svevestøvkonsentrasjon. Av praktiske årsaker er det kun utført målinger i oppholdssoenen til personer som oppholder seg på gulvet.

4.2.1 Beskrivelse av ventilasjonsanlegget i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter

Idrettsbygget på Dragvoll sto ferdig i 1998, og de tekniske anleggene i bygningen er dermed i overkant av 20 år gamle. Avtrekksviften i klatrehallen er unntaket; den ble byttet ut i 2016. Klatrehallen er et lite rom, lokalisert på sørsiden av idrettsbygget, og går gjennom tre av bygningens fire etasjer. Det er klatrevegg

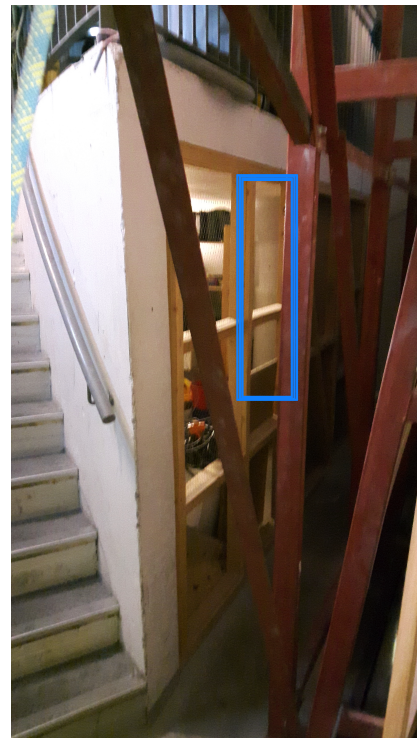
på tre av rommets vegger; alle omtrent 12 meter høye. Klatrehallen drives av Tindegruppa, en undergruppe av idrettslaget NTNUI (Norges teknisk-naturvitenskapelige universitets idrettsforening). Ifølge Tindegruppa ligger en normal personbelastning i ukedagene på rundt 6 – 10 personer, og i helgene på rundt 10 – 14 personer. Ventilasjonen i rommet er basert på prinsippet med fortregning. Tilluft med en konstant temperatur på 19,0 °C tilføres ved diffus innblåsning gjennom en tilluftsventil i trapperommet utenfor selve klatrehallen, og en døråpning slipper tilluften inn. Oppvarming av rommet skjer ved hjelp av radiatorer plassert omtrent halvveis opp på veggene som ikke har montert klatretak, som vist i figur 4.6. En egen avtrekksvifte sørger for at forurenset romluft trekkes ut. Denne er utformet som spalter i bakkant av en klatrevegg, på motsatt side av rommet fra døråpningen hvor tilluften entrer rommet, og over hele rommets høyde. Tabell 4.5 oppgir driftstidene for ventilasjonsanlegget. I driftstiden er anlegget slått på, og opererer med konstant luftmengde. Utenom driftstid er anlegget slått av. Luftmengden er prosjektert til å ligge på 1 100 m³/t, men ble den 8. mai 2019 av NTNU Drift målt til å være 1 250 m³/t.

Tabell 4.5: Driftstider for ventilasjonsanlegget i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter.

Dag	Driftstid
Mandag – fredag	06:00 – 22:00
Lørdag	08:00 – 20:00
Søndag	08:00 – 22:00

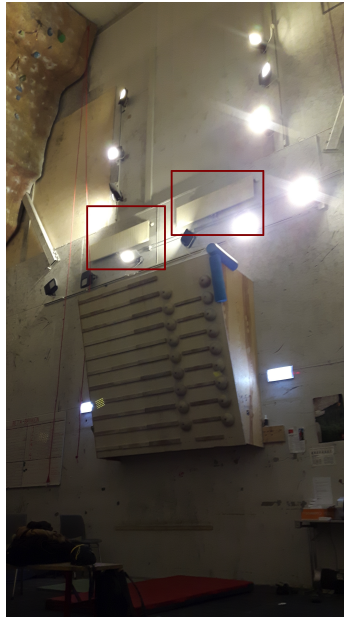


(a) Diffus innblåsning gjennom kanalventil.



(b) Tilluftsventil (markert i blått) sett fra døråpning mellom trapperommet og klatrehallen.

Figur 4.5: Tilluft tilføres klatrehallen på Dragvoll idrettssenter gjennom en kanalventil plassert i et lagerrom under trappen ned til planet hvor klatrehallen er plassert. Figurene 4.5a og 4.5b viser ventilen henholdsvis på nært hold og sett fra døråpningen.



Figur 4.6: Radiatorer (markert i rødt) omtrent halvveis opp på veggen sørger for oppvarming av klatrehallen på Dragvoll idrettssenter.

Figur 4.5a viser kanalventilen hvor tilluft tilføres rommet ved diffus innblåsning. I figur 4.5b sees den samme kanalventilen fra døråpningen mellom trapperommet, hvor ventilen er lokalisert, og klatrehallen. Denne døråpningen er den eneste veien tilluften kan gå fra ventil til klatrehallens oppholdssone.

4.2.2 Måleutstyr benyttet på Dragvoll idrettssenter

Det følgende måleutstyret er benyttet i forbindelse med luftmålingene på Dragvoll idrettssenter:

- C.A 1510 ambient air tester, Chauvin Arnoux
- Pegasor AQ Indoor™ , Pegasor

I forkant av luftmålingene ble det gjennomført tester av måleutstyret som er benyttet. En beskrivelse av hvordan dette ble gjennomført, samt resultatet av testene, er gitt i vedlegg A.

4.2.3 Utførelse av luftmålinger på Dragvoll idrettssenter

Måling av lufttemperatur, CO₂-konsentrasjon og relativ luftfuktighet

Som i Trondheim Klatresenter ble det benyttet seks *C.A 1510*-målere for logging av lufttemperatur, CO₂-konsentrasjon og relativ luftfuktighet i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Fem av målerne ble fordelt på rommets innvendige vegger; den siste ble plassert i trapperommet utenfor, så nært tilluftsventilen som mulig. Intervall for logging av data ble satt til fem minutter, og alle målerne ble programmert til å utføre målinger fra klokken 12:00 den 28. mars til klokken 09:00 den 1. april. Figur 4.7 illustrerer målernes

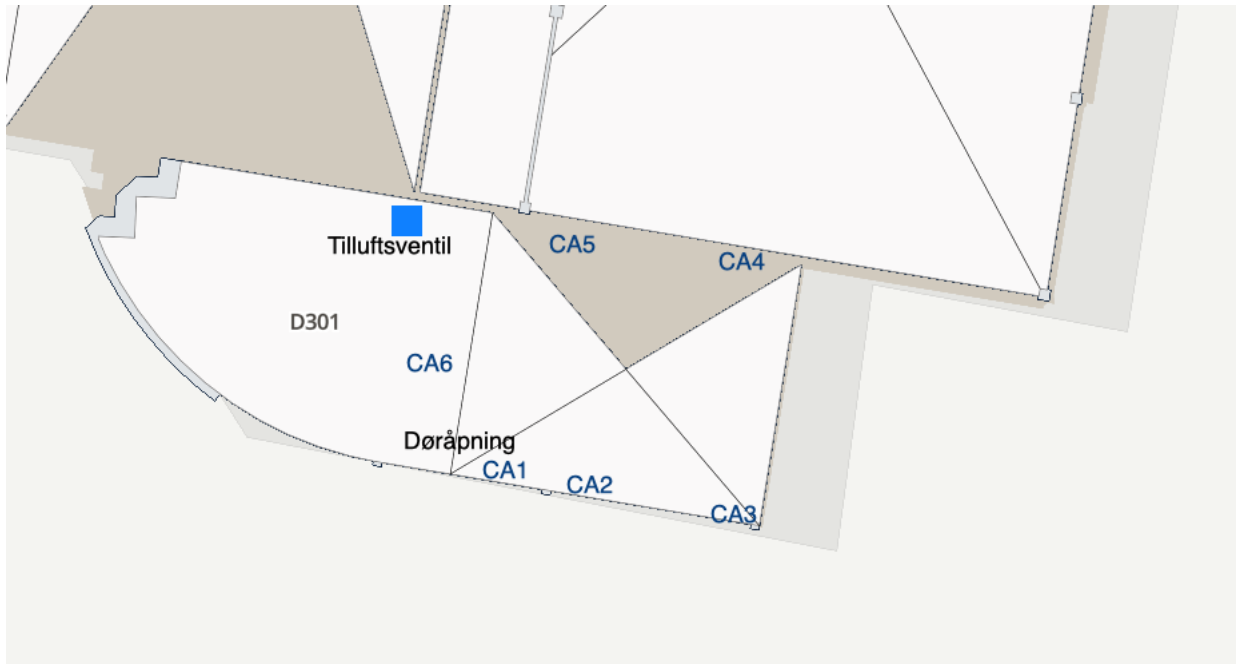
plassering i og utenfor rommet. Døråpningen mellom klatrehallen og trapperommet er markert, så vel som tilluftsventilen. Som figuren viser er måleren CA1 festet på veggen til høyre inn gjennom døråpningen. Plasseringen er valgt med tanke på å kunne evaluere hvorvidt, og isåfall i hvilken grad, tilluften blandes med romluft fra trapperommet før den kommer inn i klatrehallen. En sammenligning av målingene fra målerne CA6 og CA1 vil kunne si noe om dette. Videre er CA2 festet nært gulvet, i umiddelbar nærhet til partikkelmålingene gjort med måleapparatet *Pegasor Indoor AQ™*, beskrevet i neste delkapittel. De resterende målerne CA3, CA4 og CA5 er festet på ulike lokasjoner og høyder på de øvrige veggene, slik at målingene gir et bilde av den generelle tilstanden til romluften i oppholdssonen til personer som står på gulvet. Dette oppsummeres i tabell 4.6.

Tabell 4.6: Plassering av *C.A 1510 ambient air tester*-målere ved undersøkelsene av luftkvalitet og -temperatur i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden 28. mars til 1. april.

Navn	Plassering	Høyde over gulvet [m]
CA1	Ved inngangsdør, første vegg til høyre	1,20
CA2	Lavt på første vegg, ved <i>Pegasor</i> -apparat	0,30
CA3	Hjørne mellom første og andre vegg	1,95
CA4	På tredje vegg, høyre halvdel	1,50
CA5	På tredje vegg, venstre halvdel	1,35
CA6	Nært tilluftsventil	1,50

Målinger av svevestøvkonsentrasjon

Måleinstrumentet *Pegasor Indoor AQ™* er også på Dragvoll brukt i målinger av svevestøvkonsentrasjoner. Instrumentet ble plassert på gulvet, under et bord som brukes til oppbevaring av klatrehallens musikkanlegg. *Pegasor*-enhetens lokasjon er den samme som *C.A 1510*-måleren CA2, som vist i figur 4.7. Plasseringen er valgt med tanke på skjerming av instrumentet. Registrering av svevestøvkonsentrasjoner pågikk fra klokken 10:40 den 28. mars til klokken 06:50 den 1. april 2019, og målinger ble registrert hvert 30. sekund.



Figur 4.7: Plassering av de seks C.A 1510-målerne i og utenfor klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Kartet er hentet fra nettsiden MazeMap.no.

4.3 Spørreundersøkelse blant klatrere på Dragvoll idrettssenter

I tillegg til luftmålingene ble det i samme periode utført en spørreundersøkelse blant personene som oppholdt seg i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Spørreundersøkelsen besto av tre spørsmål, samt mulighet for å gi en utfyllende kommentar. Undersøkelsen var utformet for å være kortfattet og enkel å besvare, for å øke sjansen for å få så mange besvarelser som mulig. De følgende spørsmålene var inkludert i undersøkelsen:

1. Hvordan oppleves temperaturen i lokalet når du er i aktivitet?
2. Opplever du at det er mye støv i luften i lokalet?
3. Hvis du svarte ja på spørsmål 2: Hvor mye plages du av støv når du oppholder deg i lokalet? (Feks. tørre øyne, tørr i halsen, etc.)

Spørsmål 1 er basert på Fangers PMV/PPD-modell, som beskrevet i kapittel 2.2, og inkluderer en syv-punkts skala for avkrysning. På spørsmål 2 skal det krysses av for "ja" eller "nei", og på spørsmål 3 skal det krysses av for "plages ikke", "plages noe" eller "plages mye". Spørreundersøkelsen, slik den ble presentert til personene i klatrehallen, er vedlagt i vedlegg C. Samme sted er et informasjonsskriv som ble hengt opp i hallen i forbindelse med spørreundersøkelsen vedlagt.

Kapittel 5

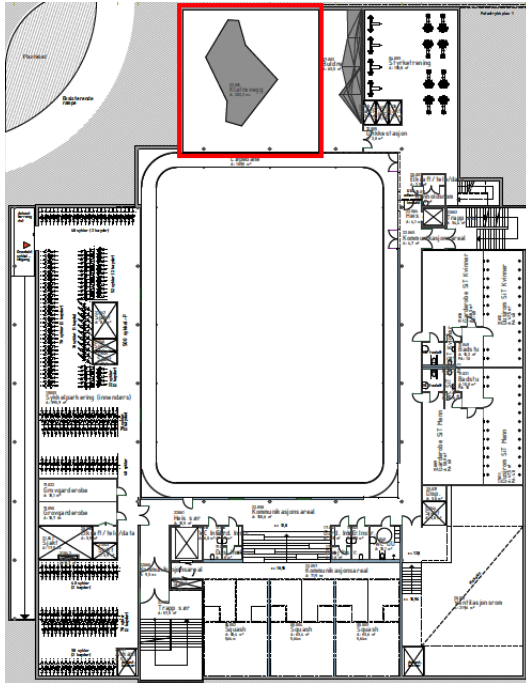
Beregning av forventet varme- og kjølebehov

Forventet varme- og kjølebehov for klatrehallen i Elgesetergate 10 har blitt beregnet ved hjelp av det dynamiske bygningssimuleringsprogrammet SIMIEN, et program for analyse av energibruk utviklet av det norske firmaet ProgramByggerne. Dette kapitlet beskriver hvordan SIMIEN-modellen er blitt utarbeidet, og presenterer antagelser og forenklinger som ble lagt til grunn for simuleringen. En fullstendig oversikt over alle inndata til modellen er samlet i vedlegg D.

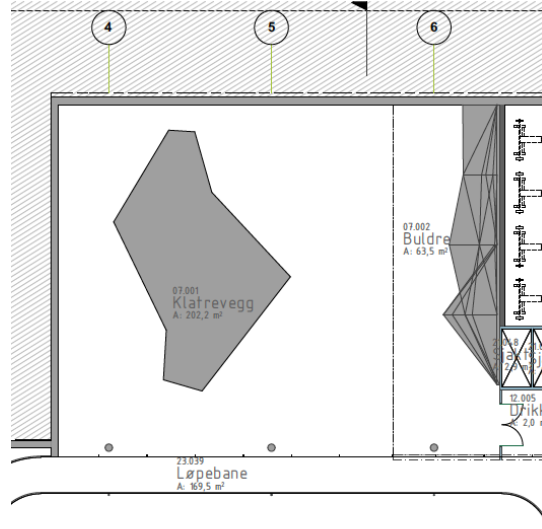
5.1 Utforming og plassering av klatrehallen i Elgesetergate 10

Rommet som vil ha funksjon som klatre- og buldreareal er plassert på det nordvestlige hjørnet av bygningen. Området beregnet for bruk av en høy klatrevegg utgjør hoveddelen av rommets samlede volum, men det er også satt av et innhuk til buldring på rommets nederste plan. Klatrehallen strekker seg over tre etasjer, fra første underetasje med gulv mot grunnen til og med byggets andre etasje. I figur 5.1a er klatrehallens plassering i bygningen merket av i rødt på arkitekttegningen for første underetasje. Figur 5.1b viser klatrehallen og buldrearealet på nærmere hold.

Synliggjøring av rom for trening er en del av en strategi for å få bygningen til å oppleves som et sted for aktivitet, helse og trivsel, og det er derfor fra byggherrens side ønskelig at rom for klatring eksponeres i bygningens fasade. Dette er bakgrunnen for at to av rommets yttervegger er planlagt utført i glass, til tross for at glassfasader fører med seg store varmetap og kan gi utfordringer knyttet til termisk komfort. Skjermbilder fra 3D-modellen utviklet i prosjektets tidlige fase er vist i figur 5.2. Figurene illustrerer hvordan klatrehallen vil se ut fra utsiden, så vel som størrelsen på fasadene. Etersom klatrehallen starter i underetasjen er de totale veggarealene større enn fasadearealene. Mot vest er arealet av hele veggen sett fra innsiden 173 m^2 , og tilsvarende areal mot nord er 182 m^2 . De to innvendige veggene, også disse i glass, vender mot arealer for styrke- og kondisjonstrening mot øst, og vestibyle og kommunikasjonsareal mot sør.

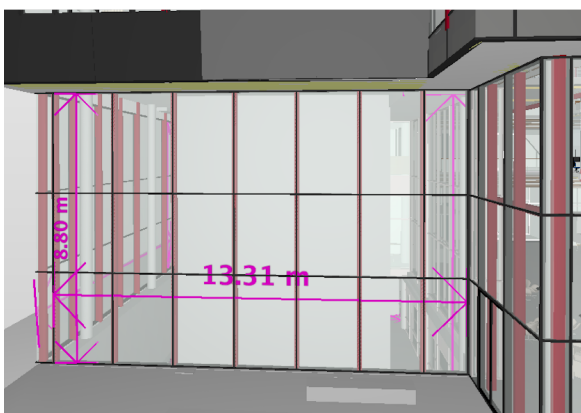


(a) Plassering av klatrehallen på bygningens nordvestlige hjørne.

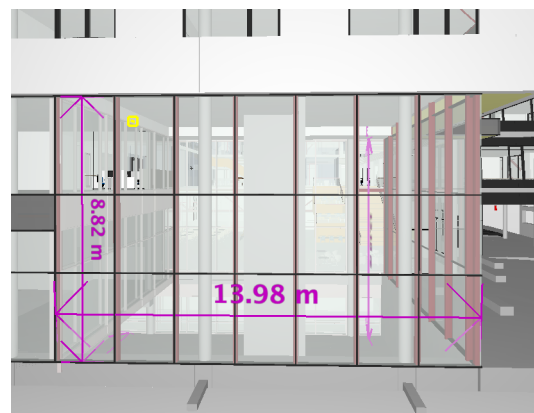


(b) Areal for klatring og buldring.

Figur 5.1: Illustrasjoner av klatrehallens plassering i bygget. Utklippene er hentet fra arkitekttegninger av plan 001 (første underetasje) fra prosjektunderlaget for Elgesetergate 10.

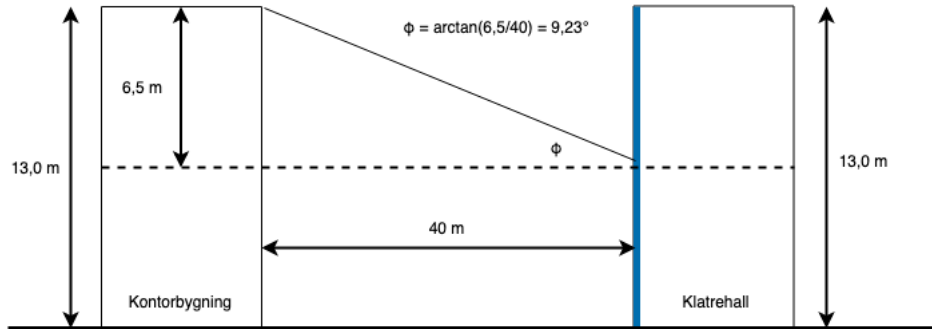


(a) Vestfasadens dimensjoner.



(b) Nordfasadens dimensjoner.

Figur 5.2: Utvendige fasadedimensjoner sett fra henholdsvis vest (5.2a) og nord (5.2b). Figurene er skjermbilder av 3D-modellen fra prosjektunderlaget for Elgesetergate 10.



Figur 5.3: Beregning av skjermingsvinkel for klatrehallens fasade mot vest.

I SIMIEN-modellen er arealet av fasadene mot nord og vest som er under bakkeplan medregnet i gulvarealet istedenfor fasadearealet. De nederste delene av de to ytterveggene er mot grunn, og varmeovergangen kan derfor tilnærmes ved å simulere arealet som gulv mot grunn. Denne metoden vil ikke gi nøyaktige resultater, ettersom varmeovergang gjennom gulv mot grunn og vegg mot grunn ikke er den samme, men ettersom energiberegningen er å betrakte som et grovt overslag regnes antagelsen for å være god nok.

5.1.1 Horisont mot vest og nord

Skjerming fra horisont mot vest og nord er anslått ved hjelp av Google Maps. Avstanden til kontorbygningen på motsatt side av veien fra vestfasaden er omtrent 40 meter. Denne avstanden ble beregnet ved å måle avstanden på kartet ved en målestokk på 1:500. Målingen på 8 cm gir dermed en avstand i terrenget på 40 meter. Dette illustreres i figur D.1 i vedlegg D. Bygningen som skjermer består av fire etasjer, og anslås til å være omtrent 13 meter høy, basert på en etasjehøyde på 2,4 meter (Direktoratet for byggekvalitet (2017b)) og en avstand mellom etasjene på 0,9 meter (Arge (2003)). For enkelhets skyld antas klatrehallens fasade å ha samme høyde, ettersom forskjellen kun er 0,3 meter og fasadens høyde regnes som usikker. For å kunne anslå gjennomsnittlig skjerming på hele glassfasaden ble skjermingen halvveis opp på fasaden beregnet. Kontorbygningen har en høyde på 6,5 meter over dette punktet, og vinkelen til toppen av kontorbygningens fasade blir som i formel 5.1. Figur 5.3 illustrerer beregningen av skjermingsvinkelen.

$$\phi_{vest} = \arctan\left(\frac{6,5}{40}\right) = 9,23^\circ \quad (5.1)$$

Etter tilsvarende metode har skjerming fra trær plassert i midtrabatten på veien nord for Elgesetergate 10 blitt beregnet. Med samme målestokk tilsvarer en måling på 2,5 cm på kartet 12,5 meter i terrenget. Høyden på trærne anslås ved hjelp av Google Maps og sammenligning med nærliggende bygninger til å være på 15 meter. Gjennomsnittlig skjerming på nordfasaden ble igjen anslått ved å beregne skjermingen halvveis opp på fasaden. Skjermingsvinkelen blir som vist i formel 5.2. Se figur D.2 i vedlegg D for illustrasjon. De nærmeste alternativene i SIMIENs innstillinger for horisont er 9 ° og 36 ° for henholdsvis

vestfasaden og nordfasaden.

$$\phi_{nord} = \arctan\left(\frac{8,5}{12,5}\right) = 34,21^\circ \quad (5.2)$$

5.2 Bruksmønster

5.2.1 Driftstider

Standarden NS 3031, "Bygningers energiytelse - Beregning av energibehov og energiforsyning", tabell A.8, oppgir normerte driftstider for idrettsbygninger. Driftstidene i henhold til standarden er gjengitt i tabell 5.1. I tabell A.8 i NS 3031 kommenteres det videre at for idrettsbygninger skal det antas at bygningen er ute av drift i uke 52 og i ukene 26 – 32, i forbindelse med avvikling av henholdsvis jule- og sommerferie, det vil si i tilsammen åtte av årets uker. (Standard Norge (2016)) Normerte driftstimer per driftsdøgn for varmtvann, utstyr, personer og belysning oppgis i andre tabeller (A.2, A.3, A.5 og A.6) i standarden, og oppsummeres her i tabell 5.2.

Tabell 5.1: Normerte driftstider for idrettsbygning i henhold til NS 3031. ^aDriftstimer oppgis i andre tabeller i standarden (se tabell 5.2).

Driftstid for:	Normert driftstid [timer/døgn/uker]
Varmtvann, utstyr, personer og belysning ^a	5/44
Ventilasjon	12/5/44
Romoppvarming	12/5/44

Normene gitt i NS 3031 er i utstrakt bruk som grunnlag for beregning av norske bygningers energibehov, men i enkelte tilfeller kan det diskuteres hvorvidt driftstidene gitt i standarden gir et riktig bilde av en bygningens reelle fremtidige driftsmønster. For idrettsbygninger er problemstillingen spesielt relevant. Organiserte arrangementer i idrettshaller, eksempelvis turneringer eller annet, foregår i stor grad i helger, og ved sentere for individuell trening kan det ikke på generelt grunnlag antas at pågangen er lavere på en helgedag enn på en hverdag.

I romfunksjonsprogrammet for Elgesetergate 10 oppgis det at normal brukstid for klatrehallen er klokken 08:00 til klokken 23:00, syv dager i uken. Et slikt driftsmønster antas å gi betydelig høyere forventet energi-

Tabell 5.2: Normerte driftstimer for varmtvann, utstyr, personer og belysning i bygningskategorien idrettsbygninger i henhold til NS 3031.

Driftstimer for:	Normerte driftstimer
Varmtvann	10
Utstyr	10
Personer	10
Belysning	10

bruk for bygningen enn man ville fått ved å legge normert driftsmønster til grunn for beregningen. Det er vurdert at driftsmønsteret oppgitt i byggherrens romfunksjonsprogram er mer realistisk enn det som er gitt i NS 3031, og dette er derfor lagt til grunn for simuleringene av energibehov som er gjort. Normert antall driftsuker (44 uker i året) vurderes å være realistisk, og er derfor brukt i alle simuleringer.

5.2.2 Internlaster

Normerte varmetilskudd fra internlaster er hentet fra standarden NS 3701, "Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Yrkesbygninger", og er samlet i tabell 5.3. Varmetilskudd fra internlaster gitt i NS 3701 er benyttet i SIMIEN-modellen.

Tabell 5.3: Normert varmetilskudd for idrettsbygning i driftstiden i henhold til NS 3701 fra belysning, teknisk utstyr og personer.

Kategori	Normert varmetilskudd [W/m ²]
Belysning	5,5
Teknisk utstyr	1,0
Personer	10,0

For belysning kommenteres det følgende: "Effektbehov til belysning settes lik varmetilskudd, dvs. at det antas at all energibruk til belysning går over til varme i bygningen" (Standard Norge (2012a)). Dermed betraktes effektbehov til belysning som varmetilskudd.

5.3 Ventilasjon og oppvarming

Det har blitt brukt et VAV-ventilasjonsaggregat i SIMIEN-modellen. Driftstiden for ventilasjonsaggregatet er satt til 07.00 – 23.00, slik at anlegget har vært i drift i en time før lokalet åpner. Luftmengder og regulering av ventilasjonsanlegget antas å ha stor betydning for hvilken energibruk simuleringen vil resultere i. Derfor er enkelte av parameterne relatert til ventilering variert for å undersøke hvilken betydning hver parameter har for energibruk.

Virkningsgrad for roterende varmegjenvinner er i byggeprosjektets energiberegninger satt til 85 %. En studie viste at en så høy virkningsgrad ikke er realistisk å oppnå (Liu et al. (2017)). Derfor settes virkningsgraden til 80 %, som er kravet i henhold til NS 3701, og som vurderes å være en mer realistisk verdi. Minimumstemperatur for rommet er i romfunksjonsprogrammet satt til 18,0 °C, og maksimumtemperatur er satt til 22,0 °C.

Nødvendig luftmengde i henhold til TEK17 når rommet er i bruk, og ved normal personbelastning, beregnes som i formel 5.3.

$$\dot{V} = 50 \text{ personer} * 26 \frac{\text{m}^3}{\text{time} * \text{person}} + 265,7 \text{ m}^2 * 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{time} * \text{m}^2} = 1964,25 \text{ m}^3 / \text{t} \quad (5.3)$$

Luftmengdekravet i TEK17 baseres på personbelastning og romareal, og tar ikke hensyn til rommets volum. Det forventes at denne luftmengden blir for lav til å opprettholde tilfredsstillende termisk og atmosfærisk inneklima, ettersom klatrehallen har betydelig større volum enn et normalt rom på én etasje. En tilnærming til nødvendig luftmengde for tilstrekkelig ventilering av rommet kan beregnes med utgangspunkt i forventet varmebelastning. I forkant av simuleringene beskrevet i neste delkapittel ble det kjørt en eksempelsimulering av en sommerdag ved dimensjonerende sommertemperatur, og varmebelastningen midt på dagen ble benyttet som utgangspunkt for beregning av luftmengdebehov. Aktivitetsnivå for personer ble satt til 2,0 met (stående, ved middels aktivitet), og luftmengden ble satt til 1964,25 m³/t, som er kravet i henhold til TEK17. Sommersimuleringen viste innendørs varmebelastning klokken 17:00 på en dag med dimensjonerende sommertemperatur som presentert i tabell 5.4.

Tabell 5.4: Beregnet varmetilskudd i klatrehallen i Elgesetergate 10 klokken 17:00 på en dag med dimensjonerende sommertemperatur.

Varmekilde	Varmetilskudd [W]
Internlaster	3 750
Solstråling	30 400
Totalt	34 150

Ved kjent dimensjonerende varmebelastning, samt differansen mellom ønsket innetemperatur og tilluftstemperatur, kan nødvendig luftmengde beregnes ved hjelp av uttrykket gitt i formel 5.4.

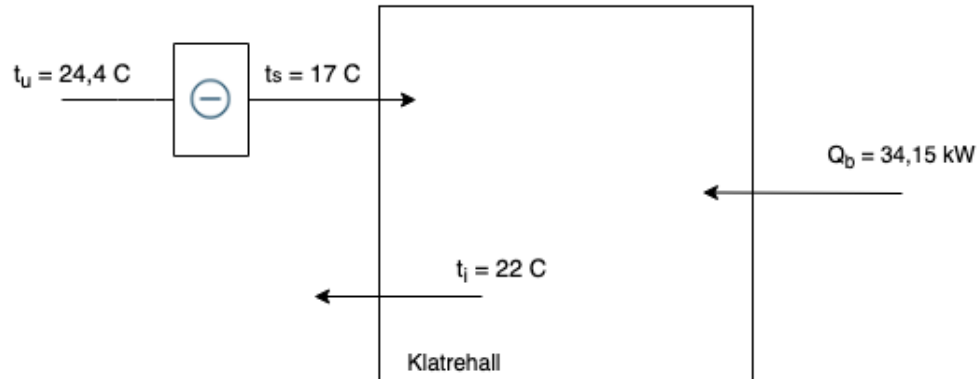
$$\dot{V} [m^3/s] = \frac{Q}{\rho_{luft} * c_p * \Delta T} \quad (5.4)$$

Hvor c_p er luftens spesifikke varmekapasitet, 1,0 kJ/kg*K, og $\rho_{luft} = 1,204 \text{ kg/m}^3$ er luftens densitet ved 20,0 °C og 1 atmosfæres trykk. Settpunktet for tilluftstemperatur om sommeren settes til 17,0 °C, og ønsket innetemperatur er 22,0 °C. Differansen ΔT blir 22 - 17 = 5 K. Figur 5.4 illustrerer en forenklet fremstilling av situasjonen brukt til beregning av nødvendig luftmengde. Temperaturene t_u , t_s og t_i er henholdsvis utelufttemperatur, tilluftstemperatur og ønsket innelufttemperatur. Varmetilskuddet Q_b er det totale varmetilskuddet fra solstråling og internlaster. Innsatt i formel 5.4 blir nødvendig luftmengde, i m³/s, som vist i formel 5.5.

$$\dot{V}_{n\ddot{o}dv} = \frac{34,15kW}{1,204kg/m^3 * 1,0kJ/kg * K * 5K} = 5,6m^3/s \quad (5.5)$$

Omgjort til kubikkmeter per timer tilsvarer dette en luftmengde på $\dot{V} = 20\ 160 \text{ m}^3/\text{t}$.

Luftmengden det her er kommet frem til er svært høy. Et anlegg som er i stand til å levere en så stor luftmengde til et enkelt rom vil ikke være praktisk å installere, ettersom det kun vil være behov for maksimal luftmengde et fåtall timer i løpet av året. En slik luftmengde vil også være svært energikrevende å levere. Luftmengden det her er kommet frem til vil derfor ikke benyttes i hoveddelen av energisimuleringene. Fremgangsmåten er likevel nyttig, fordi den demonstrerer at en høy luftmengde er nødvendig



Figur 5.4: Forenklet illustrasjon av varmetilskudd og tilførsel av kjølt tilluft til klatrehallen. Ønsket romlufttemperatur er 22,0 °C (t_i), dimensjonerende utetemperatur for sommer er 24,4 °C (t_u) og t_s er settpunkttemperatur for tilluften, på 17,0 °C. Q_b er beregnet varmetilskudd i klatrehallen ved dimensjonerende sommertemperatur.

for å kompensere for den høye varmebelastningen ved dimensjonerende sommerforhold når det settes svært strenge krav til maksimal innelufttemperatur.

Det ble besluttet å fastsette en passende luftmengde til bruk i energiberegninger ved å kjøre flere simuleringer ved varierende luftmengder, og analysere simulerte temperaturdata for sonen og finne den laveste luftmengden som må til for at anlegget i store deler av driftstiden skal klare å holde lufttemperaturen under 22,0 °C. Denne metoden resulterte i at en luftmengde på 45 m³/(t*m²), som med klatrehallens gulvareal tilsvarende 11 957 m³/t, ble brukt i videre simuleringer.

Fra et energibesparelsesperspektiv er det avgjørende å etterstrebe så lave luftmengder som mulig, uten at det i uakseptabel grad går på bekostning av inneklimate. Prosjektet i Elgesetergate 10 er underlagt strenge krav til energibruk, som beskrevet i kapittel 3, og lav energibruk til ventilasjon vil være sentralt dersom energikravene skal oppfylles. Det er derfor utført simuleringer ved en lavere luftmengde enn det som trengs for å holde maksimal lufttemperatur under 22,0 °. Denne lavere luftmengden ble satt til 35 m³/(t*m²), etter en vurdering av maksimal lufttemperatur hentet fra eksempelsimuleringer ved ulike luftmengder.

5.4 Simuleringer

Det har blitt utført totalt syv energisimuleringer, med varierende luftmengder og reguleringsstrategi. De tre første simuleringene ble utført ved høy maksimal luftmengde og de fire siste ved en lavere maksimal luftmengde. De to ulike luftmengdene som er blitt benyttet er henholdsvis 45 m³/(t*m²) og 35 m³/(t*m²). Det er blitt variert mellom luftmengderegulering for å holde romlufttemperaturen under 22,0 °C, regulering for å holde romlufttemperaturen under 28,0 °C og regulering med både 22,0 °C-kravet og regulering for å holde CO₂-nivået under 1000 ppm. Simuleringen med regulering for å holde temperaturen under 26,0 °C er gjort for å undersøke hvor stor virkning et mindre strengt temperaturkrav vil ha på energibruken til kjøling. Regulering kun med tanke på CO₂ vil gi uakseptabelt høy romlufttemperatur i perioder gjen-

nom sommerhalvåret, og det er derfor ikke kjørt separate simuleringer med denne reguleringsstrategien. Luftmengdene som er valgt til simuleringene vil ikke være tilstrekkelig for å holde maksimal lufttemperatur under 22,0 °C gjennom hele driftstiden, og det er derfor gjort en testsimulering med luftmengden som ble regnet ut i 5.5 i tillegg til simuleringene som beskrives her. Simuleringen ble gjort for å undersøke hvorvidt det er mulig å møte dette temperaturkravet kun med ventilasjonskjøling.

Det ble utført tre årssimuleringer når ventilasjonsanlegget har en maksimal luftmengde på 11 957 m³/t (45 m³/(t*m²)) med følgende verdier for de varierte parameterne:

1. Luftmengde $\dot{V} = 11\,957\text{ m}^3/\text{t}$, luftmengderegulering: $t < 22,0\text{ °C}$
2. Luftmengde $\dot{V} = 11\,957\text{ m}^3/\text{t}$, luftmengderegulering: $t < 26,0\text{ °C}$
3. Luftmengde $\dot{V} = 11\,957\text{ m}^3/\text{t}$, luftmengderegulering: $t < 22,0\text{ °C}$ og $\text{CO}_2 < 1000\text{ ppm}$

Videre ble det utført tre årssimuleringer når ventilasjonsanlegget har en maksimal luftmengde på 9300 m³/t (35 m³/(t*m²)):

4. Luftmengde $\dot{V} = 9300\text{ m}^3/\text{t}$, luftmengderegulering: $t < 22,0\text{ °C}$
5. Luftmengde $\dot{V} = 9300\text{ m}^3/\text{t}$, luftmengderegulering: $t < 26,0\text{ °C}$
6. Luftmengde $\dot{V} = 9300\text{ m}^3/\text{t}$, luftmengderegulering: $t < 22,0\text{ °C}$ og $\text{CO}_2 < 1000\text{ ppm}$

Til slutt ble det utført én simulering for å undersøke virkningen av å innføre nattkjøling på energibruk til kjøling og temperaturutviklingen gjennom dagen. Simuleringen ble utført med luftmengden innstilt på den laveste av de to verdiene som er testet; 9300 m³/t (35 m³/(t*m²)):

7. Luftmengde $\dot{V} = 9300\text{ m}^3/\text{t}$, luftmengderegulering: $t < 22,0\text{ °C}$, nattkjøling er aktivert (luftmengde ved nattkjøling: 1964 m³/t, i henhold til TEK17)

Kapittel 6

Resultater

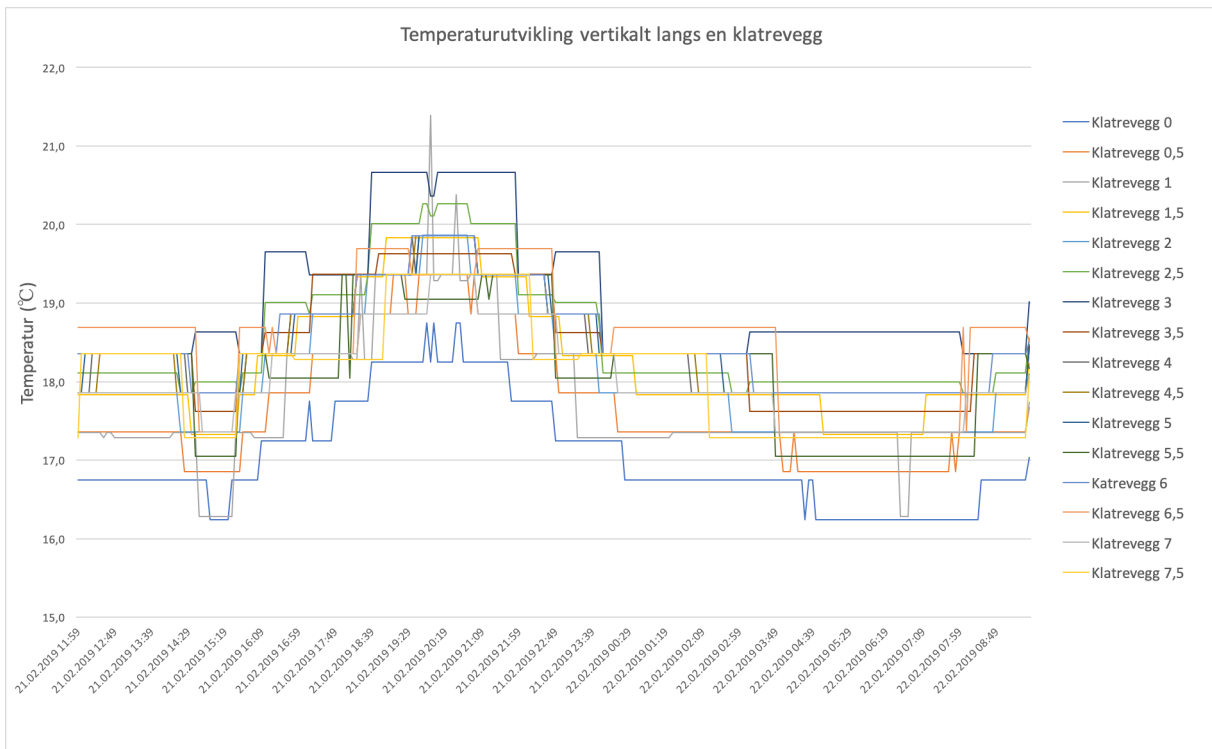
Resultatene fra luftmålingene utført i Trondheim Klatresenter, samt i klatreanlegget på Dragvoll idrettssenter, presenteres i dette kapitlet. Videre legges relevante funn fra energiberegningene utført med simuleringprogrammet SIMIEN frem.

6.1 Inneluftkvalitet og termisk miljø i Trondheim Klatresenter

Som beskrevet i kapittel 4.1 er det blitt utført en rekke målinger av ulike indikatorer for luftkvalitet i Trondheim Klatresenter. Målingene ble utført mellom den 21. februar og den 15. mars 2019, og det ble gjort målinger av lufttemperatur, CO₂-nivå, relativ luftfuktighet og svevestøvkonsentrasjoner. Dette kapitlet presenterer resultatene av de utførte målingene.

6.1.1 Målinger av lufttemperatur i Trondheim Klatresenter

Det ble benyttet i alt 25 *iButton*-temperatursensorer til målinger i klatresenteret. Av disse ble 20 sensorer benyttet til korttidsmålinger over en periode på 21,5 timer, og de resterende fem sensorene målte temperatur over en lengre periode på omtrent tre uker. I den første delen av målingene, det vil si korttidsmålingene, målte 16 sensorer temperatur vertikalt på en klatrevegg, tre gjorde målinger i ventilasjonssaggregatet og den siste målte utelufttemperaturen. Alle sensorene registrerte lufttemperatur med fem minutters mellomrom mellom hver måling. Til langtidsmålingene ble sensorene programmert til å registrere temperatur med en frekvens på én måling hvert 15. minutt. Plasseringen av de ulike sensorene, for både korttids- og langtidsmålinger, er gitt i tabellene 4.2 og 4.3 i kapittel 4.1.3. Resultatene som presenteres i dette kapitlet er basert på måledata lest av fra sensorene og er korrigert for målefeil som forklart i Appendix A, kapittel A.1. Det vil si at korreksjonsfaktoren for hver enkelt sensor, presentert i tabell A.3, er lagt til hver temperaturmåling.



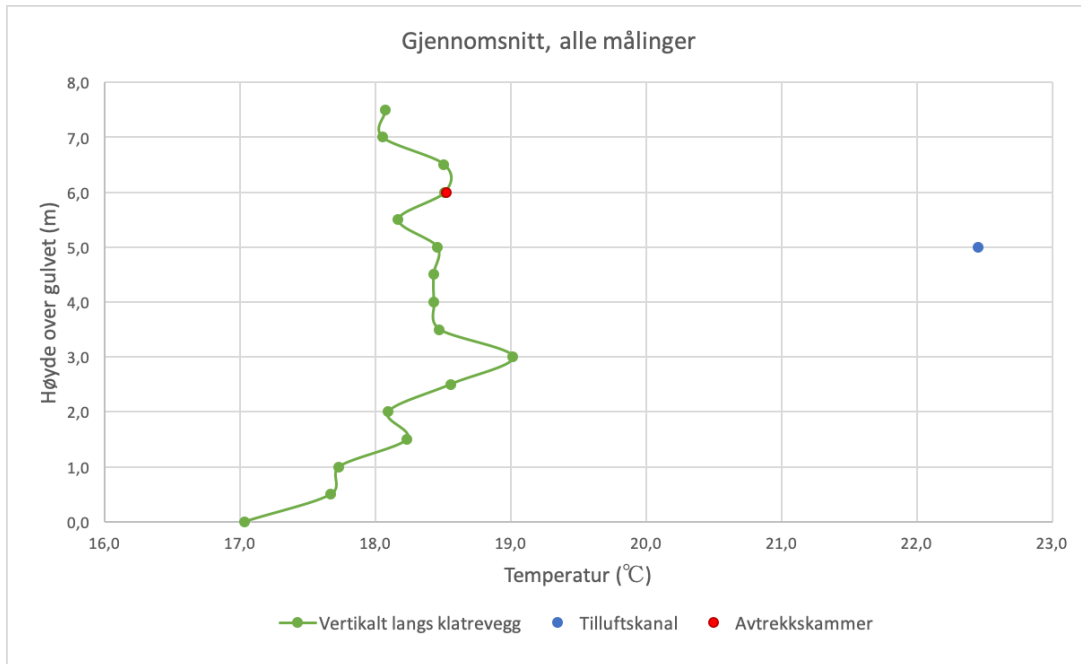
Figur 6.1: Temperaturutviklingen vertikalt langs en klatrevegg sentralt i rommet i Trondheim Klatresenter. Figuren viser målinger gjort mellom klokken 12:00 den 21. februar og klokken 09:30 den 22. februar.

Resultat av korttidsmålinger

Den første delen av temperaturmålingene ble gjort over et tidsrom på 21,5 timer, fra klokken 12:00 den 21. februar til klokken 09:30 den 22. februar. Temperatur ble registrert hvert femte minutt.

Figur 6.1 viser utviklingen i temperatur gjennom hele tidsrommet for temperatursensorene plassert vertikalt langs klatreveggen. De målte temperaturene varierer for det meste mellom 16,0 °C og 20,0 °C, det vil si samme størrelsesorden som målingene brukt til utregning av korreksjonsfaktorer for sensorene, som forklart i Appendix A, kapittel A.1. Betraktes temperaturutviklingen som helhet viser figuren en tydelig trend; i perioder med lav aktivitet varierer temperaturen vertikalt i rommet mellom omtrent 16,5 °C og 18,5 °C. Om ettermiddagen, når aktivitetsnivået i klatrehallen er høyest, varierer temperaturen oppover veggen mellom omtrent 18,2 °C og 20,2 °C, det vil si nesten 2 °C høyere enn ved lavt aktivitetsnivå. Fra kurvene i figur 6.1 kan det slås fast at temperaturen i rommet varierer når man beveger seg vertikalt langs klatreveggen, men ikke hvordan temperaturen varierer. I figur 6.2 er temperaturmålingene derfor presentert med temperatur på grafenes horisontale akse, og høyde over gulvet på grafenes vertikale akse. Temperaturmålinger i tilluftskanalen og i avtrekkskammeret er inkludert som enkeltpunkter. Formålet med disse kurvene er å få et bilde av temperatursjiktningen i rommet. Figur 6.2 viser gjennomsnittstemperaturen på hvert vertikale målepunkt gjennom hele tidsrommet korttidsmålingene ble gjennomført.

Tilsvarende fremstilling av temperatursjiktningen differensiert for ulike tider på døgnet er samlet i vedlegg B. Av figurene fremgår den samme trenden som i figur 6.2, det vil si at temperaturen er lavest ved gulvet



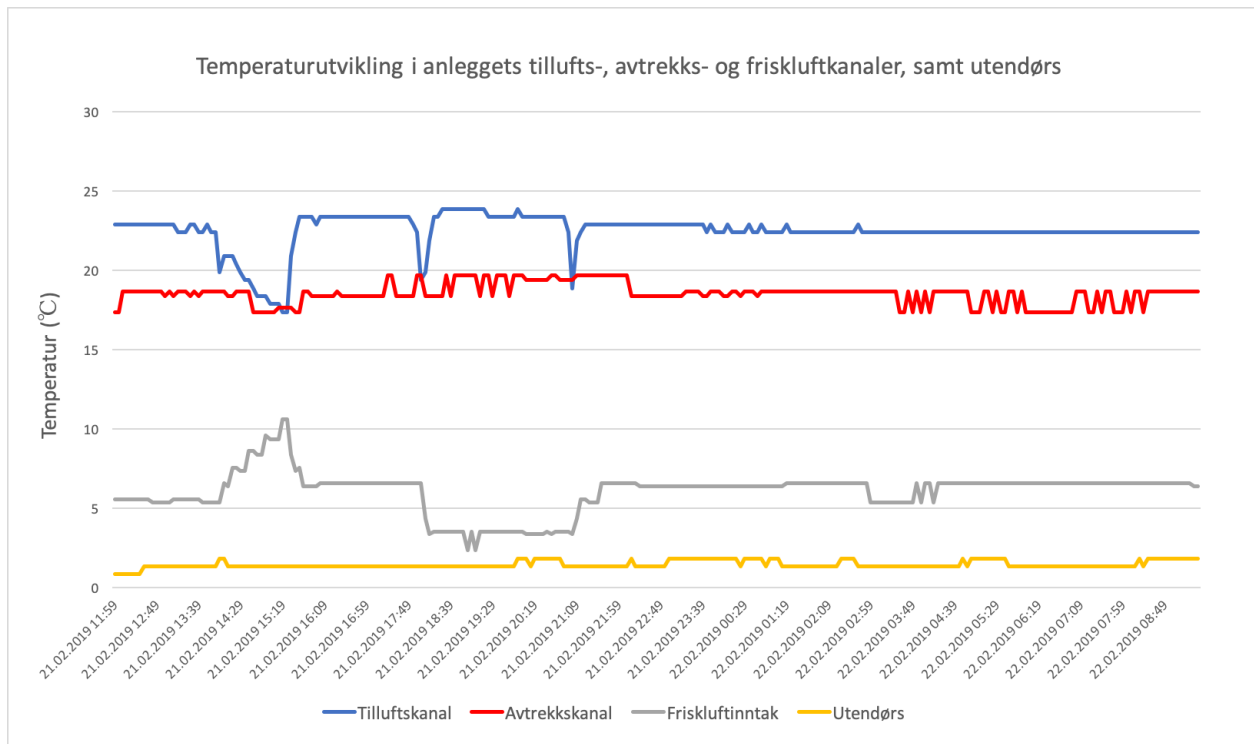
Figur 6.2: Temperatursjiktning vertikalt langs en klatrevegg i Trondheim Klatresenter når det brukes et gjennomsnitt av alle temperaturmålingene gjort i tidsrommet mellom klokken 12:00 den 21. februar og klokken 09:30 den 22. februar.

og høyest omtrent tre meter over gulvnivå. Over tre meter varierer temperaturen mellom omtrent 18,0 °C og 18,5 °C. Disse variasjonene kan med stor sannsynlighet tilskrives måleunøyaktigheter i sensorene. Det samme mønsteret går igjen for alle de fire grafene, og differansene er mindre enn måleusikkerheten i sensorene. Ved en høyde på seks meter over gulvet er det målt samme temperatur (henholdsvis 18,52 °C og 18,51 °C) i avtrekkskammeret og på klatreveggen.

Måleren som var plassert på tre meters høyde over gulvet registrerte jevnt over litt høyere temperatur enn de andre sensorene. Det ble derfor undersøkt hvorvidt testen gjort av sensorene i forkant av luftmålingene indikerer en mulig målefeil ved denne sensoren. Resultatene fra testen avkrefter dette. Det var *iButton* nr. 11 som målte temperatur ved tre meters høyde. I testen målte denne sensoren omtrent 0,8 °C lavere temperatur enn de andre ved tilnærmet uniforme omgivelser, og råmålingene er dermed blitt korrigert opp tilsvarende for å minske denne målefeilen. Det ble undersøkt hvorvidt det kan finnes en annen forklaring på at temperaturen ved tre meters høyde er høyere enn ved punktene over og under, og konkludert med at dette sannsynligvis skyldes at luftstrålen fra den nærmeste tilluftsventilen treffer dette punktet. Tilluftsventilene er vinklet nedover, men ettersom luften tilføres med overtemperatur vil luftstrålen bøyes av oppover som følge av oppdriftskreftene, som beskrevet i kapittel 2.4, og passere målepunktene på et høyere nivå enn den ville gjort uten denne effekten.

Figur 6.3 viser utviklingen i temperatur for de fire sensorene plassert i tilluftskanalen, avtrekkskanalen, kanalen for friskluftinntak og utendørs.

Som beskrevet i kapittel 4.1 ble det utført luftmålinger til en bacheloroppgave i samme tidsrom som målingene gjort til denne oppgaven, og i forbindelse med dette ble ventilasjonsaggregatet slått av omtrent



Figur 6.3: Utviklingen i temperatur kanaler og friskluftinntak i Trondheim Klatresenter, samt utendørs, mellom klokken 12:00 den 21. februar og klokken 09:30 den 22. februar.

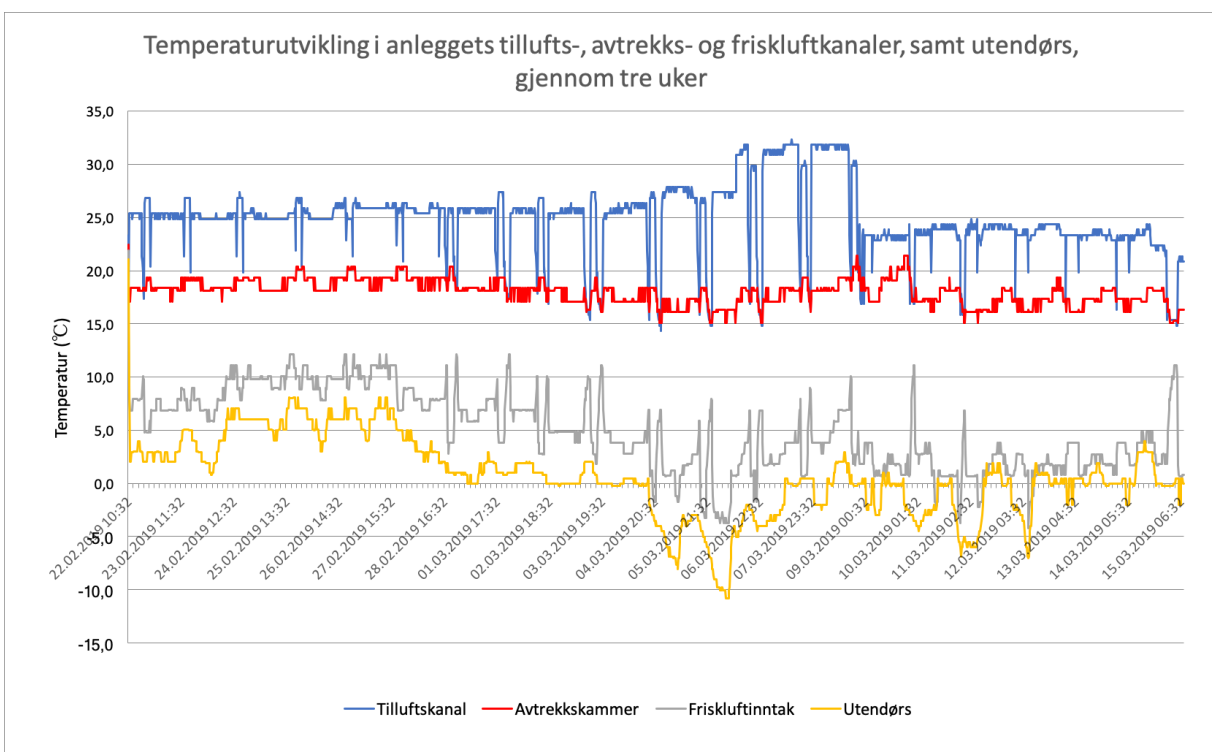
klokken 14:00 og startet opp igjen klokken 15:25. Effekten av dette kommer klart frem av temperaturmålingene i aggregatet. I denne perioden synker temperaturen på tilluften ettersom varmebatteriet er slått av, og luften i friskluftinntaket varmes opp av sirkulerende inneluft. Aggregatet ble slått på klokken 15:25, og etter dette punktet går temperaturene i både tilluftskanal og friskluftinntak tilbake mot sine normalnivå. Som følge av denne forstyrrelsen er det kun temperaturdata registrert fra og med målingen klokken 15:44 som viser anleggets funksjon i normal drift.

Temperaturen i friskluftinntaket og temperaturen i tilluftskanalen har en klar sammenheng også under normale omstendigheter. I kapittel 4.1.1 ble det beskrevet at anlegget baserer seg på omluft det meste av døgnet, men at det er frisklufttilførsel i perioden mellom klokken 18:00 og klokken 21:00, det vil si perioden i løpet av døgnet med høyest personbelastning. Temperaturendringen som starter klokken 18:00 er en respons på at ventilasjonsaggregatet skifter fra omluft til friskluftinntak. Temperaturen i friskluftinntaket synker når kald uteluft begynner å trekkes inn i kammeret. Uteluften beveger seg gjennom en kanal plassert inne i lokalet før den når sensoren, og varmes derfor noe opp på vei inn til aggregatet. Dermed holder luften i friskluftskammeret en temperatur på omtrent 2 °C over uteluften. I tilluftskanalen synker temperaturen på den tilførte luften brått, og pådraget på varmebatteriet må økes. Den korte "dippen" i lufttemperatur i tilluftskanalen skyldes forsinkelsen i denne prosessen. Etter kort tid har varmebatteriet kompensert for den lave temperaturen på tilført luft, og tilluften har igjen det ønskede temperaturnivået. Ved målingen klokken 21:00 skifter aggregatet tilbake til omluftdrift. Temperaturen i friskluftinntaket stiger, og stabiliserer seg på samme nivå som før perioden med friskluftinntak. I tilluftskanalen registreres en ny kort periode med temperaturfall. Det er ikke funnet noen forklaring på dette, men det er

mulig at det har sammenheng med automatikken i anlegget, for eksempel at varmebatteriet slår seg av før frisklufttilførselen er helt stengt.

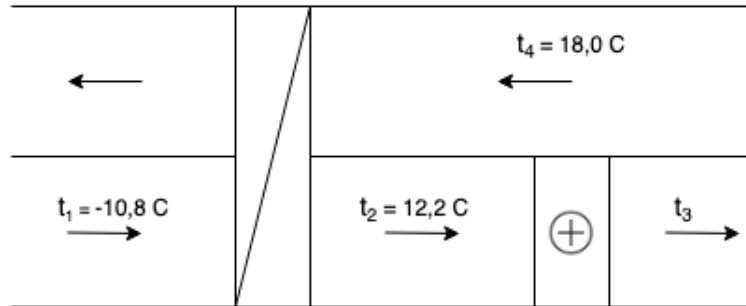
Resultat av langtidsmålinger

Den andre delen av temperaturmålingene ble gjort over en periode på tre uker, fra den 22. februar klokken 10:30 til den 15. mars klokken 08:00. Temperatur ble registrert hvert 15. minutt. De fem temperatursensorene var plassert i henholdsvis tilluftskanal, avtrekkskammer, friskluftinntak, utendørs og i senterets oppholdssone. Sensoren i oppholdssonen forsvant i løpet av tiden målingene ble gjort. Dermed er temperaturdata for denne ikke registrert, men ettersom det opereres med omrøringsventilasjon i lokalet vil data fra måleren i avtrekkskammeret gi en god indikasjon på romlufttemperaturen.



Figur 6.4: Temperaturutviklingen i Trondheim Klatresenters tillufts- og avtrekkskammer, friskluftinntak og utendørs gjennom en periode på tre uker, fra den 22. februar til den 15. mars.

Temperaturutviklingen på de fire målepunktene over hele perioden er vist i figur 6.4. Tilluftstemperaturen holdes på rundt 25,0 °C fra oppstart av målingene til den 4. mars, bortsett fra i korte perioder i forbindelse med endring av anleggets driftsmodus. Etter dette tidspunktet synker utetemperaturen til -10,0 °C på det kaldeste, den 6. mars rundt klokken 08:00. Som en respons på synkende utetemperaturer har aggregatets settpunkttemperatur for tilluft blitt økt for å kompensere for økt varmetap. Av kurven for avtrekkstemperatur er det klart at høyere tilluftstemperatur ikke gir en tilsvarende økning i romlufttemperatur, ettersom temperaturdifferansen mellom inneluften og uteluften er større i dette tidsrommet, med påfølgende større varmetap gjennom yttervegger. Gjennomsnittlig temperatur i avtrekkskammeret gjennom hele perioden var 18,0 °C.



Figur 6.5: Illustrasjon av temperaturer brukt til eksempelberging av energibehov for oppvarming av tilluft. Uteluft til venstre for figuren, inneluft til høyre. Utelufttemperatur (t_1) på $-10,8$ °C, temperatur etter varmegjenvinneren (t_2) på $12,2$ °C og konstant avtrekkstemperatur (t_4) på $18,0$ °C.

Den laveste målte temperaturen utenfor Trondheim Klatresenter var $-10,8$ °C, og på det samme tidspunktet ble tilluftstemperaturen målt til $27,4$ °C. Dette tidspunktet kan brukes som utgangspunkt for en enkel sammenligning av energibehov til oppvarming av ventilasjonsluft. Ventilasjonsanlegget i klatrehallen på Dragvoll leverer konstant tilluftstemperatur på $19,0$ °C. Radiatorer i rommet dekker et eventuelt oppvarmingsbehov. Det antas konstant utelufttemperatur på $-10,8$ °C, konstant avtrekkstemperatur på $18,0$ °C og temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner på 80 % i begge tilfellene. Figur 6.5 illustrerer temperaturen på relevante punkter i ventilasjonsaggregatet. Merk at figuren er sterkt forenklet; spjeld, vifter og filter er utelatt. I figuren er t_1 uteluft, t_2 er uteluft etter varmegjenvinneren, t_3 er tilluften som tilføres rommet og t_4 er avtrekksluft. Temperaturen etter varmegjenvinneren, t_2 , er beregnet ved hjelp av formel 2.3 og virkningsgrad for varmegjenvinneren på 80 %. Det antas at det ikke er noen varmetap i prosessen, og at varmebatteriet har en virkningsgrad på 100 %.

Energibehov til oppvarming av tilluft i løpet av en driftstid på t timer kan beregnes ved hjelp av uttrykket i formel 6.1.

$$Q[\text{kWt}] = \dot{m}[\text{kg/s}] * c_p[\text{kJ/kg} * \text{K}] * \Delta T[\text{K}] * t[t] \quad (6.1)$$

Med en luftmengde på $12\,700 \text{ m}^3/\text{t}$ ($4,25 \text{ kg/s}$), hentet fra tabell 4.1, driftstid på åtte timer og spesifikk varmekapasitet for luft, c_p , på $1,0 \text{ kJ/kg} * \text{K}$, blir resulterende energibehov for oppvarming av tilluft i de to tilfellene som presentert i tabell 6.1. Det må bemerkes at sammenligningen ikke tar hensyn til at luft tilført ved $19,0$ °C ofte må varmes opp lokalt i rommet, og at det totale energibehovet til oppvarming av romluft derfor vil være høyere enn det som går frem av tabellen.

Tabell 6.1: Beregnet energibehov for oppvarming av tilluft ved varierende settpunkttemperaturer for tilluft.

Tilluftstemperatur (t_3) [°C]	ΔT ($t_3 - t_2$) [K]	Q [kWt]
27,4	15,17	515,8
19,0	6,77	230,2

6.1.2 Målinger av CO₂-nivå, lufttemperatur og relativ luftfuktighet i Trondheim Klatresenter

Seks måleinstrumenter av typen *C.A 1510 ambient air tester*, plassert på ulike lokasjoner i lokalene til Trondheim Klatresenter, utførte målinger av CO₂, temperatur og relativ luftfuktighet mellom klokken 12:00 den 21. februar og klokken 08:00 den 22. februar. Måleapparatene har en usikkerhetsmargin som presentert i vedlegg A.

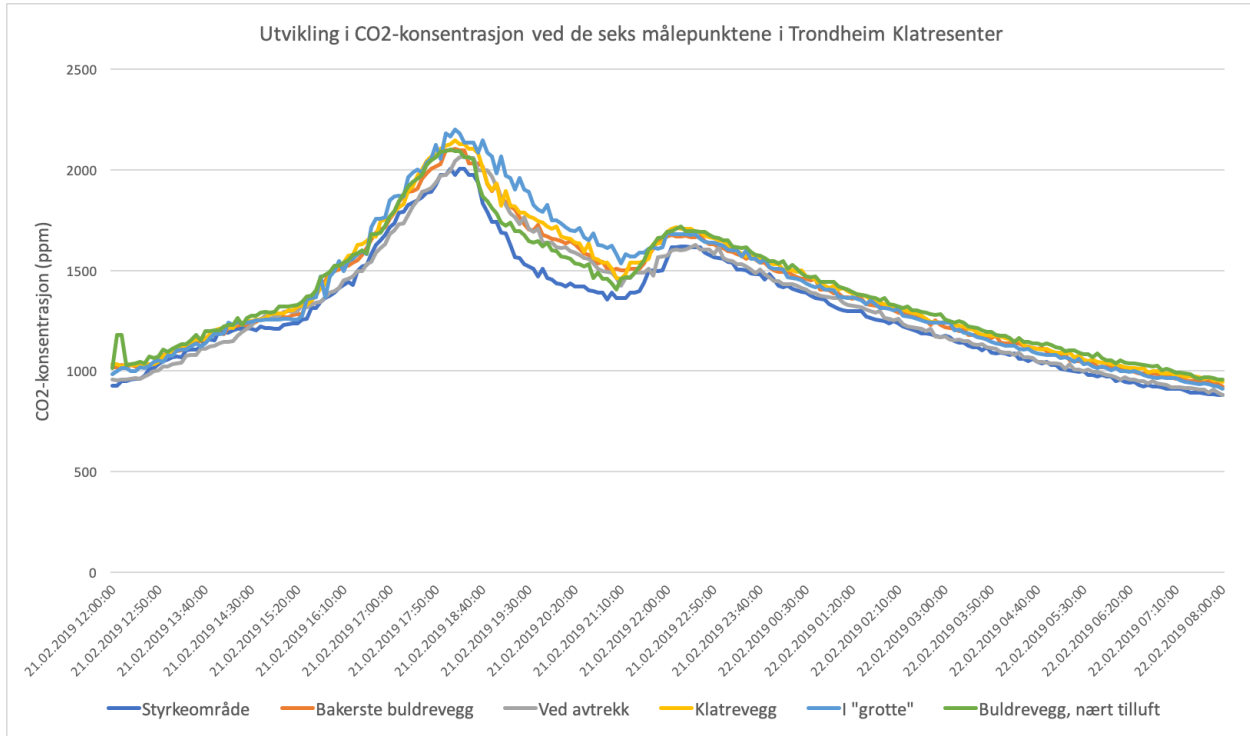
Det ble gjennom hele perioden målingene ble utført registrert høyere verdier av CO₂ enn det som er ønskelig fra et innklimaperspektiv. Den laveste registrerte verdien, uavhengig av måle-lokasjon, var 880 ppm, og den høyeste var på 2202 ppm. Gjennomsnittlig CO₂-konsentrasjon for alle målepunkter, og gjennom hele tidsrommet, var på 1375 ppm. I tabell 6.2 er høyeste og laveste, samt gjennomsnittlig, konsentrasjon av CO₂ for de seks målepunktene presentert, og figur 6.6 viser utviklingen i løpet av perioden målingene ble utført.

Tabell 6.2: Høyeste, laveste og gjennomsnittlig måling av CO₂-konsentrasjon i perioden fra klokken 12:00 den 21. februar til klokken 08:00 den 22. februar, gitt i ppm, ved de ulike målepunktene i Trondheim Klatresenter.

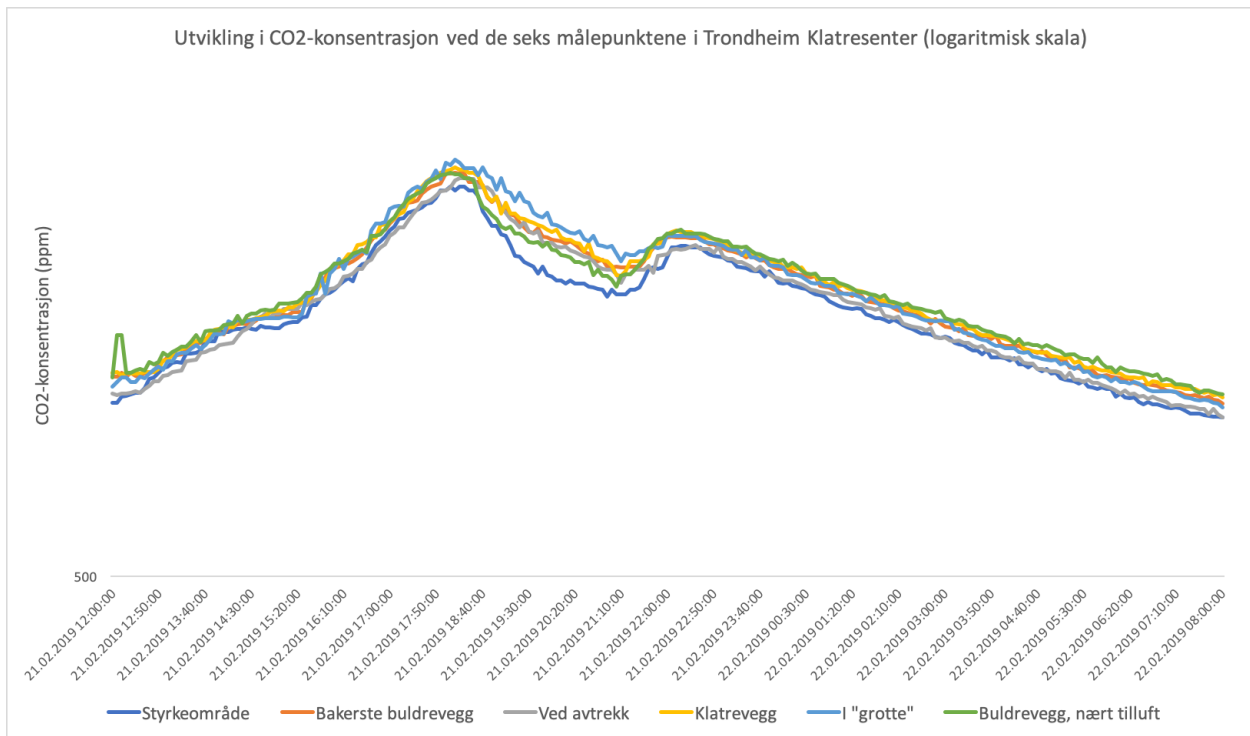
Målepunkt	Høyeste verdi	Laveste verdi	Gjennomsnitt
Styrkeområde	2006	881	1309
Bakerste buldrevegg	2103	924	1386
Ved avtrekk	2066	880	1341
Klatrevegg	2148	946	1405
I "grotte"	2202	911	1405
Buldrevegg, nært tilluft	2102	956	1401
Totalt	2202	880	1375

Fremstilles målingene av CO₂-konsentrasjonens utvikling ved de seks målepunktene på en logaritmisk skala, resulterer det i grafen vist i figur 6.7. I perioden mellom klokken 18:00 og klokken 21:00 er nivået synkende som følge av at ventilasjonsanlegget er i drift med inntak av friskluft utenfra. Når anlegget slås av, stiger konsentrasjonen noe før den igjen synker som følge av at lokalet stenger og det ikke lenger er tilførsel av CO₂ fra personer. I de to periodene med synkende konsentrasjon kunne det vært forventet at nedgangen i perioden med ventilasjon ville vært bratt sammenlignet med i perioden uten ventilasjon, men grafen har negativt stigningstall i samme størrelseområde for de to periodene. Etter klokken 21:00 er det kun infiltrasjon som påvirker nedgangen i CO₂-konsentrasjon, mens i perioden med ventilasjon vil både ventilasjonen og infiltrasjonen spille inn. Det faktum at påslått ventilasjonsanlegg ikke resulterer i betydelig brattere nedgang indikerer at lokalet har svært høy grad av infiltrasjon relativt til ventilasjonsraten.

Målinger av CO₂-konsentrasjon ble også utført av Buch og Jensås. De registrerte momentan konsentrasjon ved to ulike tidspunkt på tre målepunkter; rett før avtrekket på ventilasjonsaggregatet, i tilluftskanalen og utendørs. Resultatene er presentert i tabell 6.3. Også her viser målingene høye verdier av CO₂. Spesielt kan det legges merke til CO₂-konsentrasjonen målt i tilluftskanalen, som var på over 1000 ppm både når anlegget driftes basert på omluft (klokken 12:49) og når det trekkes inn friskluft utenfra



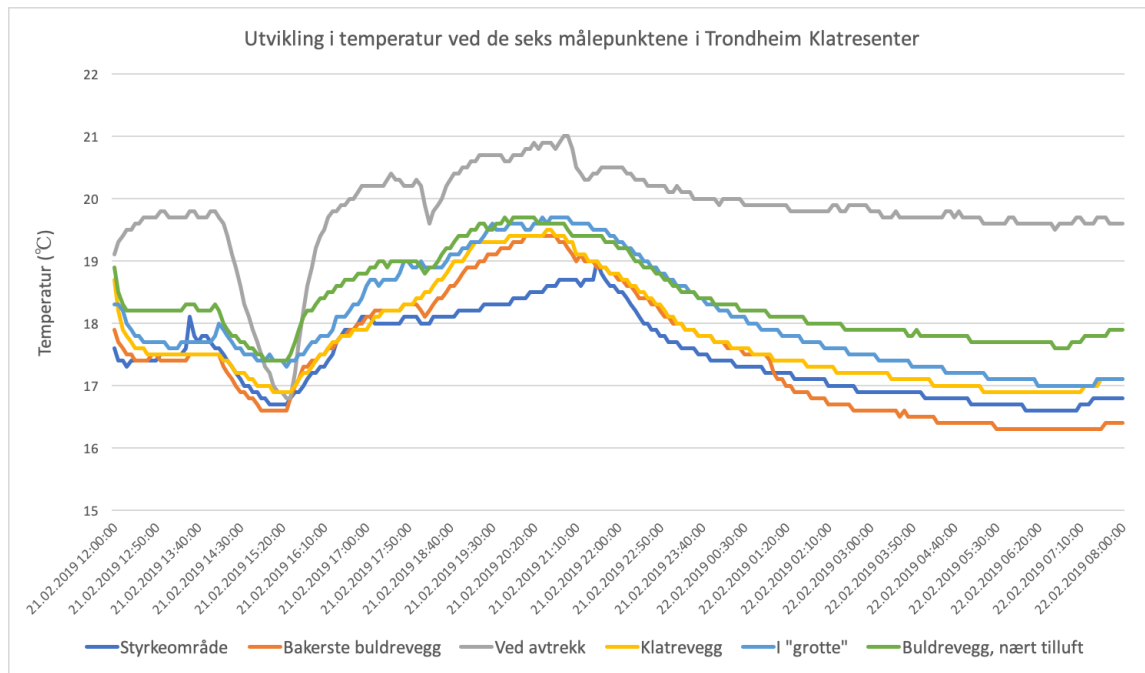
Figur 6.6: CO₂-konsentrasjon ved ulike målepunkter i Trondheim Klatresenter i løpet av perioden fra klokken 12:00 den 21. februar til klokken 08:00 den 22. februar.



Figur 6.7: Utvikling av CO₂-konsentrasjon i Trondheim Klatresenter i perioden fra klokken 12:00 den 21. februar til klokken 08:00 den 22. februar, med logaritmisk skala på y-aksen.

Tabell 6.3: Momentan CO₂-konsentrasjon ved ulike målepunkter i Trondheim Klatresenter den 21. februar. Målingene er utført av Buch og Jensås.

Målepunkt	Tidspunkt	CO ₂ -konsentrasjon [ppm]
Ved aggregat, rett før avtrekk	12:45	1182
	19:21	1685
I tilluftskanal	12:49	1057
	19:27	1348
Utendørs	09:32	452
	18:09	478



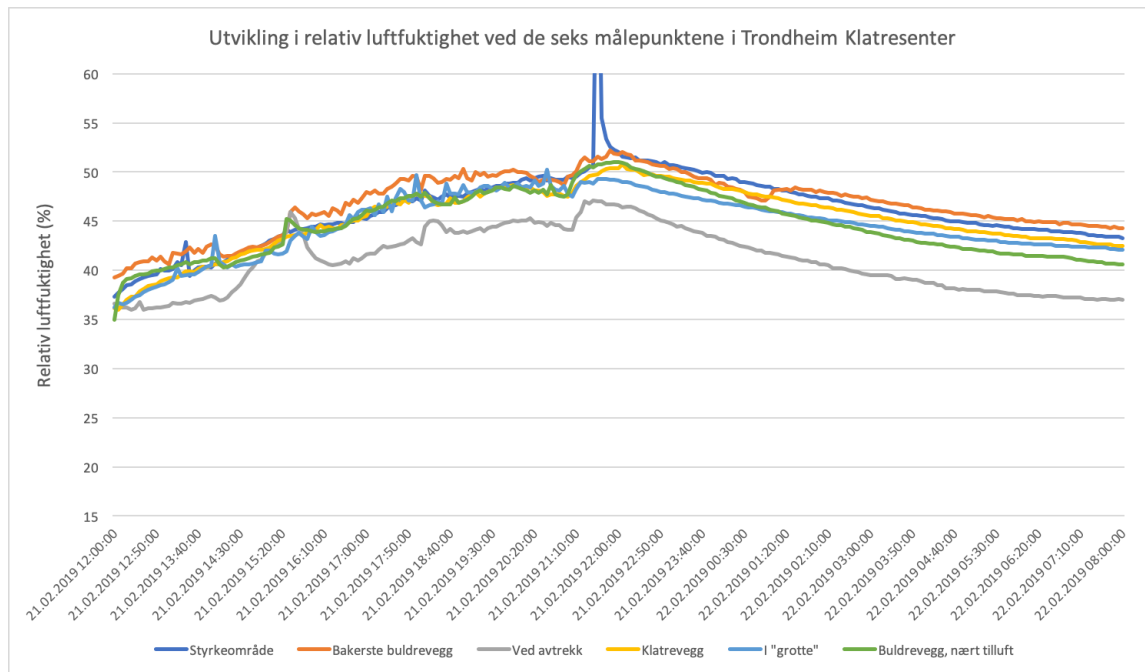
Figur 6.8: Målt lufttemperatur ved ulike målepunkter i Trondheim Klatresenter i løpet av perioden fra klokken 12.00 den 21. februar til klokken 08.00 den 22. februar.

(klokken 19:27). Konsentrasjonen utendørs ble målt til å være betydelig lavere. Resultatet indikerer at friskluften blir forurenset med "brukt" inneluft med høy CO₂-konsentrasjon før den når tilluftskanalen.

Videre ble temperatur og relativ luftfuktighet registrert. Figur 6.8 viser temperaturutviklingen, og figur 6.9 viser utviklingen av relativ luftfuktighet i løpet av perioden målingene ble utført. I figur 6.9 er den vertikale akse skalert for å ikke inkludere målingen klokken 21:35 den 21. februar, som var på 80,5 % RF. Ettersom målingene bortsett fra i dette punktet holder seg i området rundt 35 – 50 % RF antas denne målingen å være en feil.

6.1.3 Målte konsentrasjoner av svevestøv i Trondheim Klatresenter

Pegasor-apparatet for måling av svevestøvkonsentrasjon var som forklart i kapittel 4.1.3 plassert i resepsjonsområdet i Trondheim Klatresenter. Konsentrasjon av PM_{2,5}-partikler ble registrert over en periode

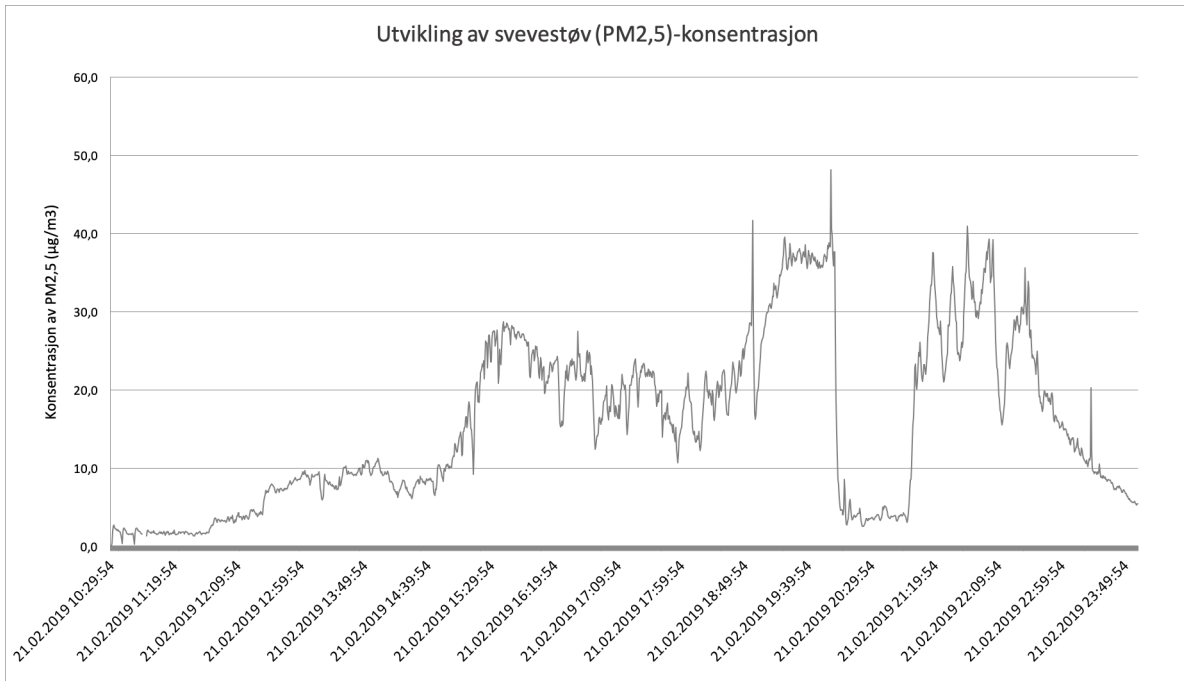


Figur 6.9: Relativ luftfuktighet ved ulike målepunkter i Trondheim Klatresenter i løpet av perioden fra klokken 12.00 den 21. februar til klokken 08.00 den 22. februar.

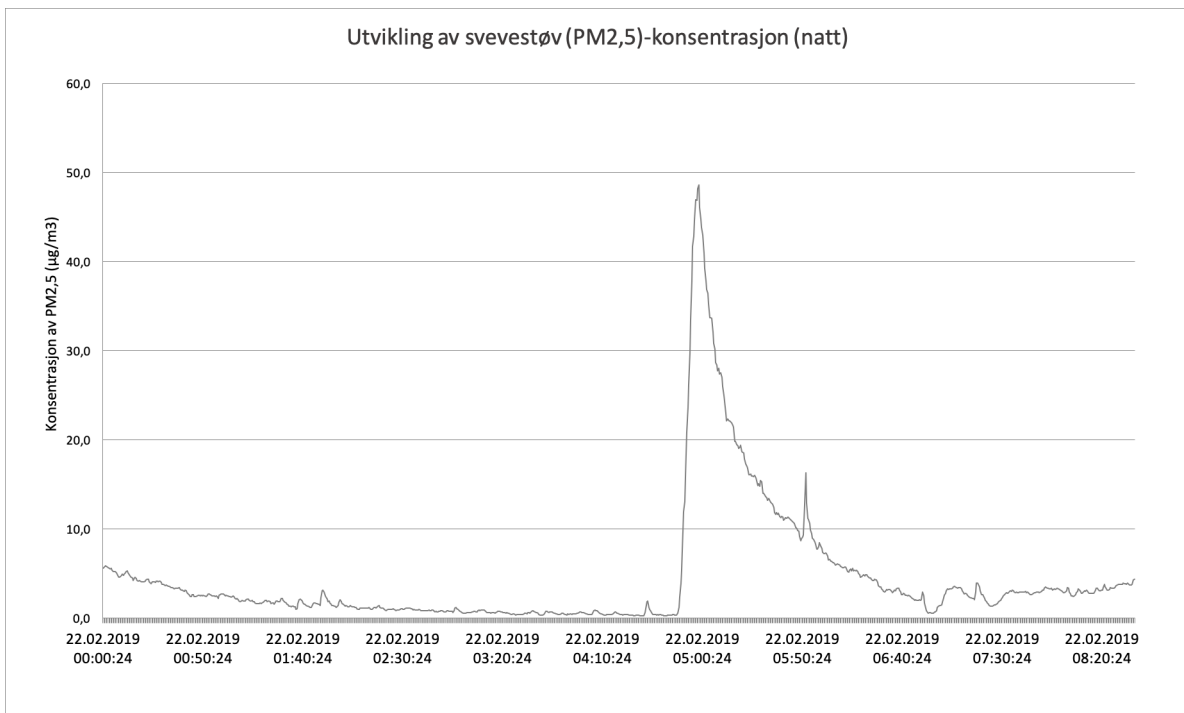
på 22 timer, fra klokken 10:30 den 21. februar til klokken 08:30 den 22. februar. Måledata frem til klokken 10:30 den 22. februar var tiltenkt å inkluderes i disse resultatene, for å kunne fastslå døgnmiddelverdi for svevestøvkonsentrasjon, men data for de to timene mangler fra råfilen hentet fra apparatet. Det er uvisst hvorvidt dette skyldes brukerfeil eller feil eller mangel på apparatet.

Den gjennomsnittlige konsentrasjonen av svevestøv i størrelsesfraksjonen $0 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$ var på $11,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for de 22 timene svevestøvkonsentrasjon ble registrert. Dette er under grenseverdien for døgnmiddelkonsentrasjon fastsatt av Folkehelseinstituttet, som er på $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, men i kortere tidsrom i løpet av døgnet ble det registrert langt høyere konsentrasjoner. Figur 6.10 viser utviklingen av konsentrasjonen av $\text{PM}_{2,5}$ for den 21. februar. Som forventet stiger konsentrasjonen fra relativt lave nivåer på formiddagen, som er en periode med lav personbelastning, til høyere verdier senere på dagen, som er den perioden med flest klatrere til stede. Fra konsentrasjoner på rundt $1 \mu\text{g}/\text{m}^3 - 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fra morgenen av øker nivået fra omtrent klokken 12:00. Den høyeste konsentrasjonen ble registrert klokken 19:57, og er på $48,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Etter dette tidspunktet synker den målte konsentrasjonen brått nesten ned til det samme nivået som ble registrert tidlig på formiddagen, før den øker igjen etter en time. Klatresenteret stenger klokken 22:00, og fra klokken 22:30 vises det på målingene at svevestøvkonsentrasjonen begynner å synke.

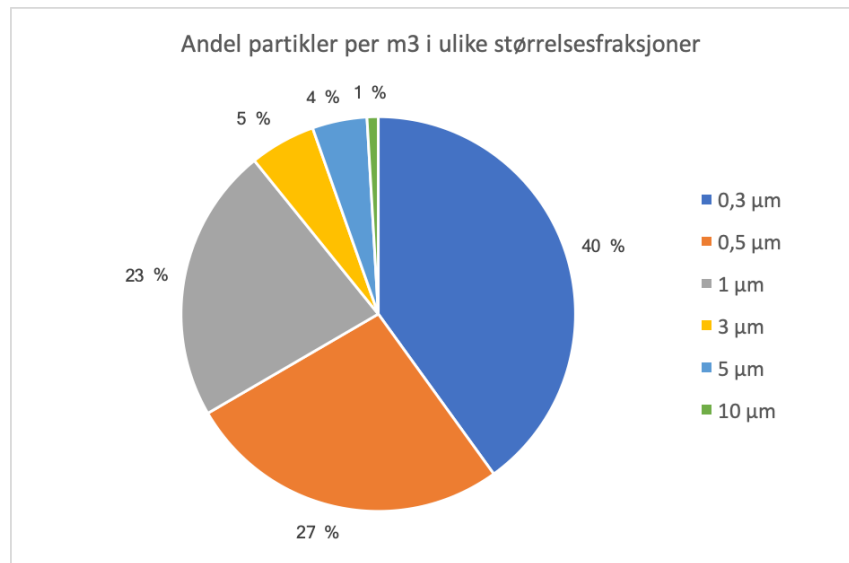
I løpet av natten viser målingene jevnt lave konsentrasjoner. Figur 6.11 viser utviklingen fra midnatt til klokken 08:30 den 22. februar. Klokken 05:00 ble luftmengden økt, og effekten er tydelig på målingene av svevestøv. I løpet av omtrent 10 minutter stiger konsentrasjonen av fine partikler fra $0,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ til $48,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I løpet av natten synker partiklene og legger seg på overflater, og dermed blir støvkonsentrasjonen i luften lav. Men når luftmengden økes brått, fører økningen i luftstrålernes bevegelsesmengde til at støvet virvles opp og spres i lufta igjen.



Figur 6.10: Utvikling av svevestøvkonsentrasjon i Trondheim Klatresenter gjennom dagen den 21. februar 2019.



Figur 6.11: Utviklingen av svevestøvkonsentrasjon i Trondheim Klatresenter gjennom natten 21. – 22. februar.



Figur 6.12: Fordeling av svevestøvpartikler på ulike størrelsesfraksjoner. Målingen er utført av Buch og Jensås i Trondheim Klatresenter den 21. februar.

Buch og Jensås utførte også målinger av partikkelkonsentrasjoner i Trondheim Klatresenter, som beskrevet i kapittel 4.1. Resultatene fra målingene er samlet i tabellene i figur E.1, figur E.2 og figur E.3 i vedlegg E. Konsentrasjon er målt i antall partikler per m³ for ulike størrelsesfraksjoner. Det er ikke funnet grenseverdier eller retningslinjer for partikkeltall per volum.

Det var forventet at partiklene som slippes ut i luften ved bruk av klatrekalk vil fordele seg på flere ulike størrelsesfraksjoner. I målingene utført med apparatet *Pegasor AQ Indoor* registreres kun partikler med aerodynamisk diameter på under 2,5 µm; såkalte fine partikler. Mye av svevestøvet i lokalene blir derfor ikke registrert med dette apparatet. Buch og Jensås benyttet et måleinstrument av typen AERO-TRAK Handheld Particle Counter i sine målinger. Apparatet gir konsentrasjon av partikler for ulike størrelsesfraksjoner som antall partikler per m³, og resultatene fra målingene til Buch og Jensås kan dermed benyttes til å si noe om størrelsesfordelingen på partiklene i lokalet. Midt i hallen, klokken 11:33 den 21. februar, registrerte Buch og Jensås konsentrasjon av partikler innenfor ulike størrelsesfraksjoner som presentert i figur 6.12. Diagrammet viser at det er klart flest av de minste partiklene, og for hver størrelsesfraksjon man går opp, går antallet partikler ned. 40 % av de målte partiklene hadde en diameter på under 0,3 µm, mens kun 1 % hadde en diameter på mellom 5 µm og 10 µm. Resultatet viser at partikkelmålingene gjort med *Pegasor*-måleapparatet filtrerer bort over 60 % av støvpartiklene som finnes i lokalet.

6.1.4 Evaluering av fremgangsmåte for luftmålinger i Trondheim Klatresenter

I arbeidet med denne oppgaven er det utført luftmålinger i to eksisterende innendørs klatreanlegg; Trondheim Klatresenter og klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. De to lokalene ventileres basert på ulike prinsipper, og resultatene kan derfor gi indikasjoner på hvorvidt de to prinsippene egner seg for bruk i klatreanlegg, men det må vektlegges at tilsvarende undersøkelser må gjennomføres i flere lignende lokaler

for å kunne konkludere med best egnede løsning. Mange andre faktorer enn ventilasjonsprinsipp spiller inn på innhentede måledata, og målinger kun i ett lokale for hvert ventilasjonsprinsipp er derfor ikke tilstrekkelig til at det kan legges stor vekt på resultatene.

I Trondheim Klatresenter ble det utført målinger av temperatur, CO₂-konsentrasjon, relativ luftfuktighet og svevestøvkonsentrasjon over en periode på omtrent et døgn. Resultatene beskriver hvordan tilstanden i lokalet var gjennom dette døgnet, men det kan ikke vites om luftens tilstand i løpet av tiden målingene ble gjort er representativ for et normalt driftsdøgn. Resultatene må derfor betraktes som beskrivende for et eksempeldøgn, ikke for et gjennomsnittlig døgn. Det ble i tillegg utført temperaturmålinger i Trondheim Klatresenter gjennom en periode på tre uker; resultatene fra langtidsmålingene gir et mer komplett bilde av temperaturutviklingen i lokalet over tid, samt av sammenhengen mellom innelufttemperatur og utelufttemperatur.

Valg av plassering av måleapparatene er gjort med tanke på å unngå trekk, stråling og annen påvirkning som vil forringe resultatene. Likevel må det regnes med at ekstern påvirkning har hatt betydning for målingene som er gjort, både for temperatursensorene, *CA 1510*-målerne for temperatur, CO₂ og relativ luftfuktighet, og for apparatet for måling av svevestøvkonsentrasjon.

Temperatursensorene montert på klatreveggen i Trondheim Klatresenter ble plassert så langt unna lysarmaturer som mulig, men det kan likevel ikke utelukkes at stråling fra disse har virket inn. Det ble plassert temperatursensorer på innsiden av ventilasjonsaggregatet for måling av tillufts-, avtrekks- og friskluftstemperaturer. Det var ikke praktisk gjennomførbart å plassere tilluftssensoren i tilluftskanalen, og denne var derfor plassert noen centimeter innenfor varmebatteriet, i et stort kammer hvor strømningsmønsteret ikke er kjent. Det ble derfor antatt at denne sensoren ikke ville gi nøyaktige registreringer av den faktiske temperaturen i tilluftskanale. En tilsvarende situasjon gjaldt for sensoren i friskluftinntaket; også her måtte sensoren plasseres et sted hvor det ikke var kjent hvorvidt luften var fullstendig blandet, og om målingene derfor ville være unøyaktige. Resultatene fra temperaturmålinger med de to nevnte sensorene synes likevel å være fornuftige, og indikerer at plasseringen har vært god nok til å oppnå målinger som i rimelig stor grad beskriver temperaturutviklingen gjennom ventilasjonsanleggets ulike driftsfaser.

CA 1510-målerne utførte målinger ved ulike lokasjoner fordelt i oppholdssonen til personer som oppholder seg på gulvnivå i klatresenteret. De noe utsatte plasseringene ble valgt med tanke på å beskrive kvaliteten på luften som blir pustet inn av disse personene, men det ble dermed risikert at apparatene ble flyttet på eller på andre måter tuklet med, med medfølgende forringelse av måledata. Målingene av relativ luftfuktighet fra måleren *CA1*, plassert i senterets styrkeområde, viser at en slik ekstern påvirkning sannsynligvis har skjedd. Jevne måledata ble avbrutt av én måling som var nesten dobbelt så høy som gjennomsnittet for alle målingene. Den plutselige økningen kan for eksempel skyldes at en person pustet på, eller i umiddelbar nærhet til, apparatet. Et slikt tilfelle ville medført en tilsvarende økning i målt CO₂-konsentrasjon, men på tidspunktet det gjelder var CO₂-konsentrasjonen ved målepunktet allerede på rundt 1500 ppm, og det er mulig at en person som pustet i nærheten derfor ikke ville hatt synlige utslag på målingene.

Apparatet for målinger av svevestøvkonsentrasjon ble i Trondheim Klatresenter av praktiske hensyn plassert bak resepsjonsdisken, fremfor å ha det stående på et punkt sentralt i oppholdsområdet. Plasseringen

antas å føre til at måleresultatene viser lavere konsentrasjoner av svevestøv enn de ville gjort på et mer utsatt sted.

Det ble i forkant av luftmålingene utført tester av måleapparatene *iButtons* og *C.A 1510 ambient air tester*, som beskrevet i vedlegg A. For temperatursensorene *iButtons* ble det funnet at sensorene ikke måler nøyaktig samme temperatur ved tilnærmet uniforme omgivelser, og det ble innført en korreksjonsfaktor for å sikre at sensorene hadde, i så stor grad som mulig, samme kalibrering. Kalibreringstesten ble utført ved temperaturer i området 18,0 °C – 19,0 °C, og de beregnede korreksjonsfaktorene kan derfor ikke med sikkerhet antas å gjelde utenfor dette temperaturområdet. Måleresultatene fra sensorene plassert inne i lokalet viste i hovedsak temperaturer i området 17,0 °C – 20,0 °C. Korreksjonsfaktorene antas å være gjeldende for målinger i dette området, ettersom avviket fra temperaturene målt i testen er små. Temperaturmålingene gjort utendørs varierte mellom -11,0 °C og 8,0 °C, og for sensorene i ventilasjonsaggregatet ble det gjort målinger opp mot 30,0 °C. Det er derfor kun for sensorene plassert inne (ikke i aggregatet) at korreksjonsfaktorene er utarbeidet på riktig grunnlag. Likevel er alle målingene korrigeret, da tidsbruk til tester for alle temperaturområdene ikke er prioritert. Det må regnes med usikkerhet i temperaturdata registrert ved hjelp av *iButton*-sensorene. En test av *C.A 1510*-målerne ble også utført, og det ble konkludert med at nøyaktighet for apparatene som oppgitt av produsenten ville benyttes. Nøyaktighet for de tre indikatorene apparatet måler (temperatur, CO₂-nivå og RF) er gitt i tabell A.6 i vedlegg A. Resultatene fra luftmålingene utført med disse måleapparatene kan ikke betraktes som helt nøyaktige, men de anses likevel å gi verdifulle målinger ettersom usikkerheten er liten sammenlignet med variasjonen i de ulike indikatorene i løpet av måleperiodene.

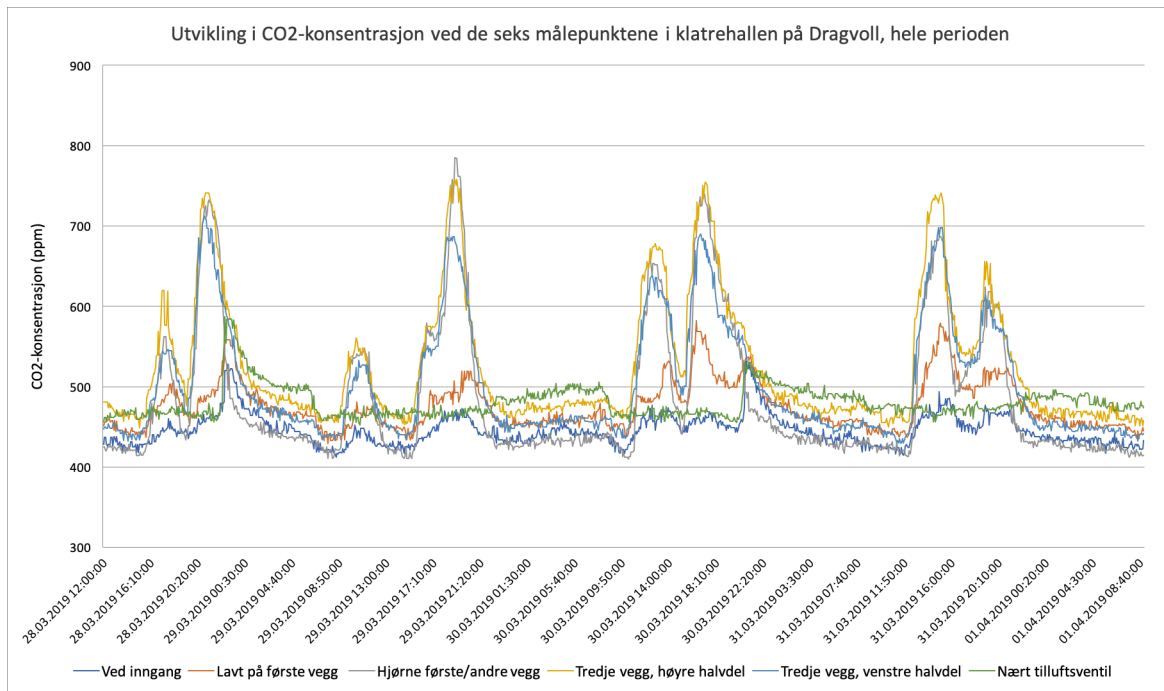
6.2 Inneluftkvalitet og termisk miljø i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter

Som beskrevet i kapittel 4.2.3 er det blitt utført målinger av ulike indikatorer for luftkvalitet i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Målingene ble utført mellom den 28. mars og den 1. april 2019, og det ble gjort målinger av lufttemperatur, CO₂-nivå, relativ luftfuktighet og svevestøvkonsentrasjoner. Dette kapitlet presenterer resultatene av de utførte målingene.

6.2.1 Målinger av CO₂-nivå, lufttemperatur og relativ luftfuktighet på Dragvoll idrettssenter

Seks måleinstrumenter av typen *C.A 1510 ambient air tester*, plassert på ulike lokasjoner i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter, utførte målinger av CO₂, temperatur og relativ luftfuktighet mellom klokken 12:00 den 28. mars og klokken 09:00 den 1. april 2019. Måleapparatene har en usikkerhetsmargin som presentert i vedlegg A.

Resultatene viser jevnt over lavere verdier av CO₂ enn det som ble målt i Trondheim Klatresenter. Den høyeste registrerte CO₂-konsentrasjonen gjennom perioden målingene ble utført, uavhengig av målepunkt, var på 785 ppm. Den laveste konsentrasjonen var på 410 ppm, som tilsvarer nivået utendørs. Gjennomsnittlig CO₂-konsentrasjon for alle målepunktene var på 485,9 ppm. I tabell 6.4 presenteres høyeste, laveste og gjennomsnittlig CO₂-konsentrasjon for de seks målepunktene. Figur 6.13 viser utviklingen i



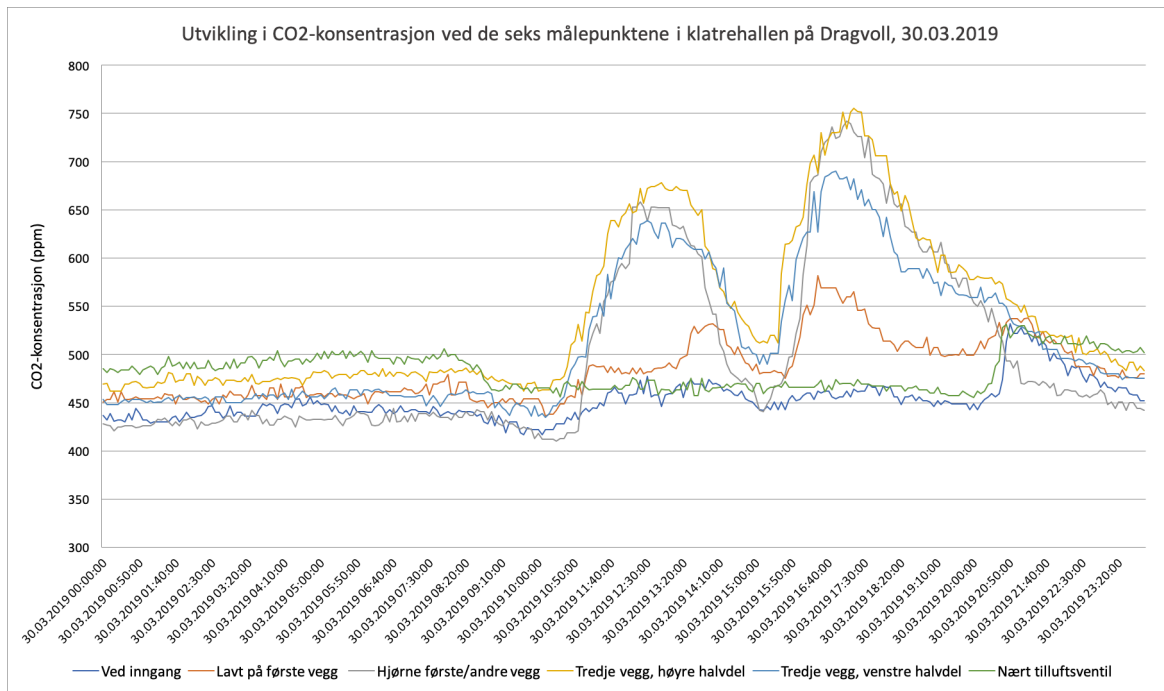
Figur 6.13: Utvikling i CO₂-konsentrasjon ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra 28. mars til 1. april.

CO₂-konsentrasjon gjennom hele perioden.

Tabell 6.4: Høyeste, laveste og gjennomsnittlig måling av CO₂-konsentrasjon, gitt i ppm, ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra klokken 12:00 den 28. mars til klokken 09:00 den 1. april.

Målepunkt	Høyeste verdi	Laveste verdi	Gjennomsnitt
Ved inngang	532	412	445,5
Lavt på første vegg	582	429	475,3
Hjørne første/andre vegg	785	410	485,5
Tredje vegg, høyre halvdel	758	449	526,3
Tredje vegg, venstre halvdel	712	430	502,8
Nært tilluftsventil	587	452	480,1
Totalt	785	410	485,9

I figur 6.13 kan de fire dagene målingene ble gjort tydelig observeres; hver dag karakteriseres av to perioder med økt CO₂-nivå i lokalet. Toppene inntreffer på ulike tidspunkter fra dag til dag, og indikerer økt personbelastning i lokalet. Figur 6.14 viser utviklingen kun for døgnet 30. mars. Den 30. mars 2019 var en lørdag, hvilket vil si at ventilasjonsanleggets driftstid denne dagen var fra klokken 08:00 til klokken 20:00. Nivået av CO₂ holder seg relativt konstant i området mellom 400 og 500 ppm fra midnatt og frem til klokken 08:00 for alle målepunktene. Klokken 08:00 slås ventilasjonsanlegget på, og CO₂-konsentrasjonen synker som følge av tilførsel av uteluft. I periodene med aktivitet i rommet er det klare forskjeller i CO₂-konsentrasjon på de ulike målepunktene. De tre målerne lengst inne i lokalet, med størst avstand til tilluftsventilen, viser tydelig økt CO₂-konsentrasjon, mens målerne plassert nært tilluftsven-



Figur 6.14: Utvikling i CO₂-konsentrasjon ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i løpet av døgnet 30. mars.

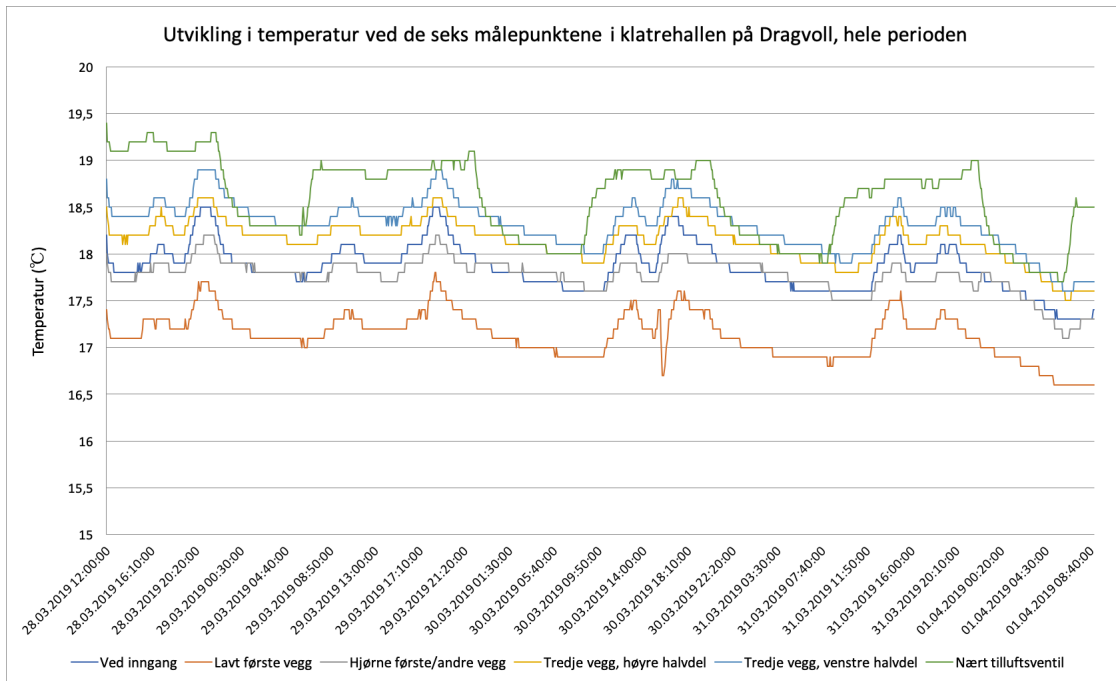
tilen ikke viser store utslag på økt personbelastning. For de to målerne med minst avstand til tilluftsventilen sees ingen økning i CO₂-konsentrasjonen før ventilasjonsanlegget slås av, klokken 20:00.

Videre ble det gjort målinger av lufttemperatur og relativ luftfuktighet på de samme seks målepunktene. Resultatene for hele perioden er presentert i figur 6.15 og i figur 6.16. Gjennomsnittsmålinger for alle målepunktene for alle de tre indikatorene er presentert i figur 6.17. Temperaturen varierer kun innenfor et lite intervall på omtrent 2 °C, mellom 17,0 °C og 19,0 °C, og ser derfor konstant ut presentert på samme akse som den relative luftfuktigheten, som varierer mellom 20 % og 40 %.

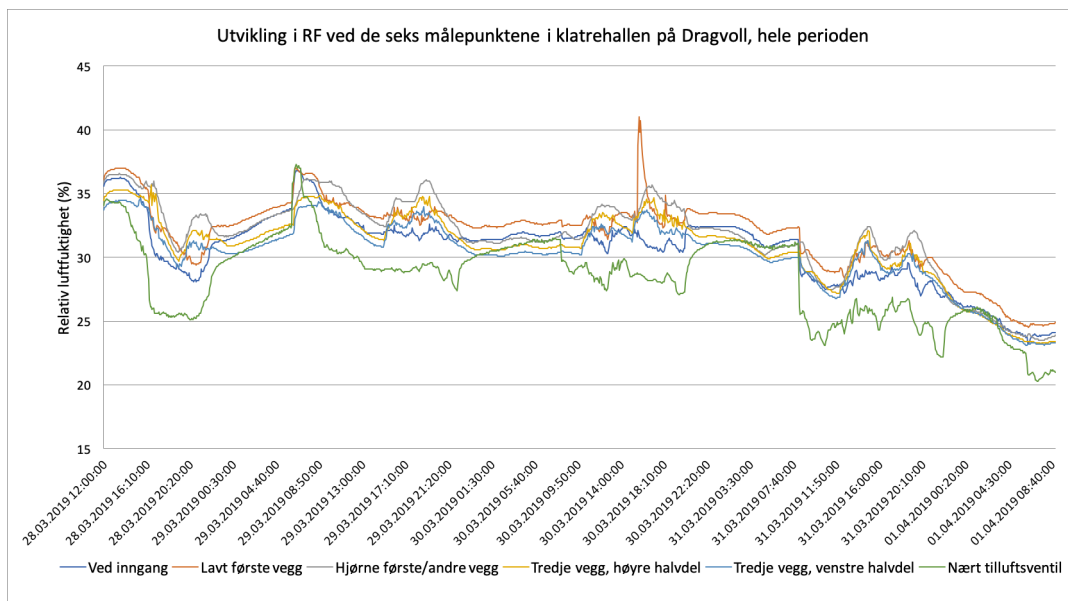
Temperaturutviklingen for de ulike målepunktene er presentert i figur 6.15. Av figuren kan det sees at måleren nærmest tilluftsventilen har registrert temperatur rett over eller rett under 19,0 °C i driftstiden, et resultat som stemmer godt overens med at tilluften har en konstant settpunkttemperatur på 19,0 °C. Måleren som var plassert rett innenfor inngangsdøren til klatrehallen har registrert jevnt over litt lavere temperatur. Det indikerer at noe av tilluften blandes med luften i det uoppvarmede trapperommet ventilen står plassert i før luften når klatrehallen. Den laveste registrerte temperaturen er fra måleren som var plassert nært gulvet. Resultatet tyder på en positiv temperaturgradient med lavest temperatur på gulvnivå, og indikerer dermed at fortrenings-effekten fungerer som tenkt.

6.2.2 Målte konsentrasjoner av svevestøv på Dragvoll idrettssenter

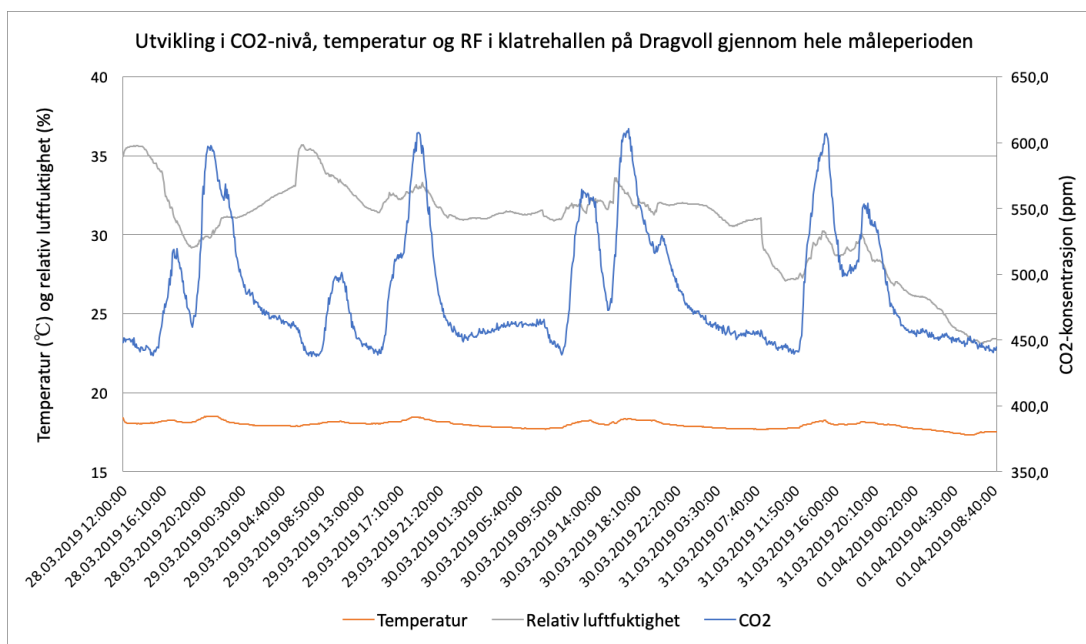
Apparatet for måling av svevestøvkonsentrasjon gjorde målinger i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i en periode på rett i underkant av fire døgn, fra klokken 10:40 den 28. mars til klokken 06:50 den 1. april.



Figur 6.15: Utvikling i lufttemperatur ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra 28. mars til 1. april.



Figur 6.16: Utvikling i relativ luftfuktighet ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra 28. mars til 1. april.



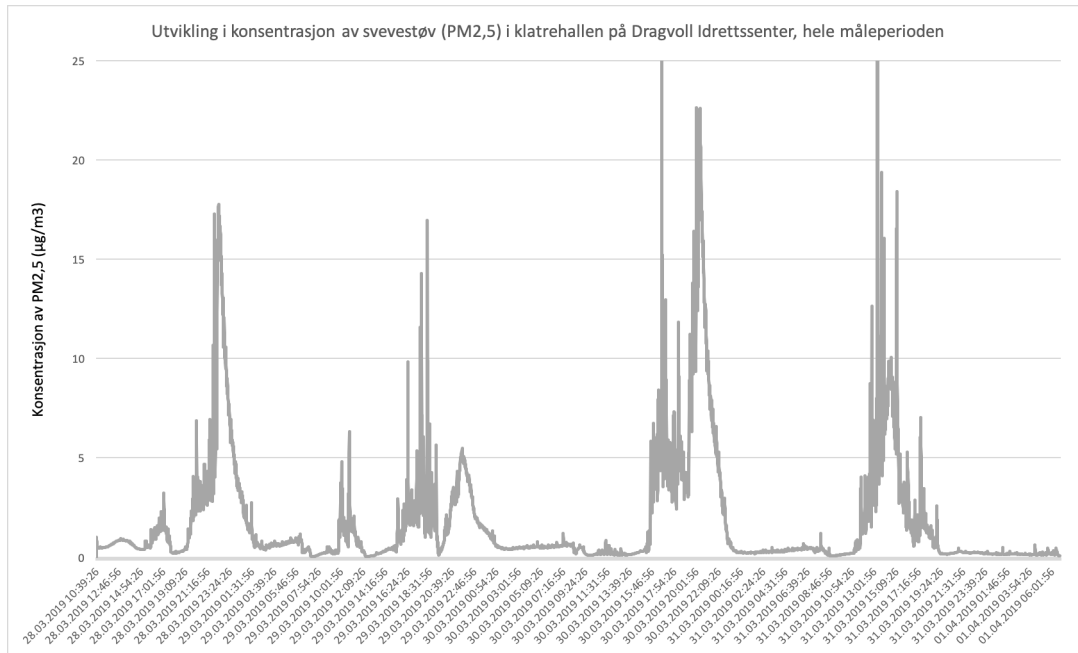
Figur 6.17: Utvikling i CO₂-konsentrasjon, temperatur og relativ luftfuktighet ved de ulike målepunktene i klatrehallen på Dragvoll idrettsenter i perioden fra 28. mars til 1. april.

I tabell 6.5 oppgis målt middelkonsentrasjon av PM_{2,5} for de fire døgnene målinger ble gjort. Middelkonsentrasjonen for 22 timer er brukt istedenfor døgnmiddel, for å få en rettferdig sammenligning med resultatene fra Trondheim Klatresenter, hvor to timer med data manglet. Det anses likevel å være fornuftig å sammenligne resultatene med Folkehelseinstituttets grenseverdi for døgnmiddelkonsentrasjon, ettersom det bare mangler to av 24 timer. Samtlige middelkonsentrasjoner er langt under Folkehelseinstituttets anbefalte grenseverdi på 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabell 6.5: Middelkonsentrasjon av svevestøv (PM_{2,5}) i klatrehallen på Dragvoll idrettsenter, gitt i $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tidsintervall	Middelkonsentrasjon [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
28.03 10:40 – 29.03 08:40	1,86
29.03 10:40 – 30.03 08:40	1,29
30.03 10:40 – 31.03 08:40	2,60
31.03 08:50 – 01.04 06:50	1,79

Figur 6.18 viser utviklingen i svevestøvkonsentrasjon gjennom hele måleperioden. Den vertikale akse er skalert ned for å ekskludere to målinger som antas å skyldes målefeil. Dette gjelder en måling på 78,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 30. mars klokken 16:43, og en måling på 485,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 31. mars klokken 13:21. De to aktuelle målingene viser verdier på henholdsvis 43 og 266 ganger den gjennomsnittlige konsentrasjonen, og regnes ikke å vise reelle verdier. Sees det bort fra de to målingene som antas å være resultat av målefeil, er de høyeste registrerte konsentrasjonene av svevestøv per dag som presentert i tabell 6.6. Tidspunktene for de høyeste konsentrasjonene av svevestøv korresponderer i stor grad med tidspunktene for økt konsentrasjon av CO₂, se figur 6.17. Sammenhengen kommer av at de to indikatorene er tett knyttet til aktivitetsnivået i lokalet; flere klatrere til stede medfører både økt bruk av kalk og økt produksjon av CO₂.



Figur 6.18: Utvikling i konsentrasjon av svevestøv (PM_{2,5}) i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter i perioden fra 28. mars til 1. april.

Tabell 6.6: Høyeste registrerte konsentrasjon av svevestøv (PM_{2,5}) i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter, per dag.

Dato	Maksimal konsentrasjon av PM _{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
28.03.19	17,8
29.03.19	17,0
30.03.19	22,6
31.03.19	19,4

I Trondheim Klatresenter ble det registrert en kraftig økning i svevestøvkonsentrasjon på det samme tidspunktet som ventilasjonsanleggets luftmengde ble økt om morgenen. For å sjekke hvorvidt en lignende effekt kan registreres i klatrehallen på Dragvoll er målt konsentrasjon i perioden fra 10 minutter før til 30 minutter etter anlegget ble slått på undersøkt. Figurene B.4, B.5, B.6 og B.7 i vedlegg B viser utviklingen i målt svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter idet ventilasjonsanlegget startes opp om morgenen for henholdsvis 29. mars, 30. mars, 31. mars og 1. april 2019. De to første dagene sees en merkbar nedgang i konsentrasjon av støv omtrent 15 minutter etter at anlegget slås på. Den tredje dagen sank konsentrasjonen jevnt fra anlegget ble slått på. Den siste dagen med målinger sees det ingen sammenheng mellom aktivering av ventilasjonsanlegget og konsentrasjon av svevestøv.

6.2.3 Evaluering av fremgangsmåte for luftmålinger på Dragvoll idrettssenter

I klatrehallen på Dragvoll idrettssenter ble det utført luftmålinger over en periode på fire døgn, fra torsdag 28. mars til søndag 1. april. Ventilasjonsanleggets driftsmønster varierer som oppgitt i tabell 4.5, og ved å legge målingene til denne perioden ble alle de tre ulike driftstidene inkludert. Likevel er dette en for kort måleperiode for å kunne beskrive luftkvaliteten i lokalet over tid med god sikkerhet. Resultatene må betraktes som gjeldende kun for den aktuelle helgen, og antas å ville variere over lengre tid med varierende personbelastning og utelufttemperatur.

C.A 1510-målerne var plassert på ulike steder i og utenfor rommet, lett tilgjengelig for personer som oppholdt seg i klatreanlegget. Det var derfor også her en risiko for overlatt påvirkning på målingene, men ettersom klatrehallen på Dragvoll kun er tilgjengelig for studenter ble sannsynligheten for dette vurdert som lavere enn i Trondheim Klatresenter, hvor en stor andel av brukerne er barn.

6.2.4 Resultater av spørreundersøkelse om termisk komfort og luftkvalitet

I en periode på fire dager, fra og med torsdag 28. mars til og med søndag 31. mars, var spørreskjemaet tilgjengelig for besvarelse i klatrehallen. I løpet av denne tiden ble det levert 24 besvarelser. Dette kapitlet presenterer resultatene av den gjennomførte spørreundersøkelsen.

Termisk komfort

Av de 24 svarene var det kun seks som krysset av for noe annet enn 0, det vil si termisk nøytralitet, på spørsmålet om termisk komfort. Den gjennomsnittlige verdien var -0,0625. Innsatt i formel 2.1 gir dette en PPD på 5,08 %. Dette indikerer god termisk komfort i lokalet, ettersom den minste mulige PPD-verdien er 5,0 %. Det må likevel tas med i betraktningen at det er svært få svar, og at hvert enkelt svar derfor har store utslag på resultatet. Figur 6.19 viser fordelingen av svar på spørsmålet om hvor på skalaen man opplever at omgivelsetemperaturen i lokalet er.

Av figuren kan det observeres at personen som krysset av for -3 trekker det totale gjennomsnittet ned uforholdsmessig mye sammenlignet med de andre besvarelene. Et rent aritmetisk gjennomsnitt er derfor ikke en gunstig måte å beregne PMV på i dette tilfellet. Brukes istedenfor medianverdien fås en PMV



Figur 6.19: Oversikt over besvarelser på spørsmålet "Hvordan oppleves temperaturen i lokalet når du er i aktivitet?" i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter. Besvarelser er gitt ved å krysse av på en skala fra -3 (veldig kaldt) til 3 (veldig varmt).

på 0, som gir den laveste mulige PPD-verdien, 5 %. Det samme skjer dersom typetallet benyttes som PMV-verdi. Tabell 6.7 oppsummerer dette. Ved alle de tre metodene oppnås en svært lav PPD-verdi. Dette indikerer et termisk miljø som i stor grad tilfredsstillende ønskene og forventningene personene som oppholder seg i lokalet har til sine termiske omgivelser. Dette resultatet kan, sammen med temperaturmålinger fra perioden undersøkelsen ble besvart, brukes til å fastslå hvilken lufttemperatur det bør forsøkes å holde i et innendørs klatreanlegg.

Tabell 6.7: PMV og PPD som resultat av spørreundersøkelse om termisk komfort i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter, for de ulike typer sentralmål.

Sentralmål	PMV	PPD
Gjennomsnitt	-0,0625	5,08 %
Median	0	5,0 %
Typetall	0	5,0 %

Gjennomsnittlig temperaturdata fra målerne CA1, CA3, CA4 og CA5 antas å gi en god indikator på temperaturnivået i oppholdssonen, ettersom de var plassert i området fra 1,2 meter til 1,95 meter over gulvet. Måleren CA2 var plassert nært gulvet, og CA6 var plassert utenfor rommet. Spørreundersøkelsen ble besvart i tidsrommet fra klokken 08:00 til klokken 20:00. Den gjennomsnittlige temperaturen for dette tidsrommet og for de fire oppholdssonemålerne gjennom alle dagene målingene foregikk var 18,07 °C. Resultatet tyder på at ved en temperatur på omtrent 18,0 °C vil det i stor grad oppnås tilfredsstillende termisk komfort for personer som oppholder seg i innendørs klatreanlegg.

Inneluftkvalitet

De to påfølgende spørsmålene i undersøkelsen dreide seg om det atmosfæriske miljøet; nærmere bestemt om ubehag relatert til svevestøv. På spørsmål 2, "Opplever du at det er mye støv i luften i lokalet?", svarte 11 personer "ja", og 12 svarte "nei". Én person besvarte ikke spørsmålet. Oppfølgingsspørsmålet dreide seg om hvorvidt personen plages av eventuelt svevestøv når vedkommende oppholder seg i lokalet. Av de 11 som svarte "ja" på spørsmål 2 var det åtte som videre svarte at de "plages noe" av svevestøv. De resterende tre personene krysset av for alternativet "plages ikke". Ingen krysset av for alternativet "plages mye". Resultatene oppsummeres i punktlisten under.

- 11 av 24 (45,8 %) svarte "ja" på spørsmålet om hvorvidt det oppleves at det er mye støv i luften i lokalet.
- Tre av de 11 som opplever at det er mye svevestøv i rommet "plages ikke" av dette.
- Åtte av de 11 som opplever at det er mye svevestøv i rommet "plages noe" av dette.

Totalt åtte av 24 (33,3 %) personer oppgir altså at de "plages noe" av svevestøv når de oppholder seg i lokalet. Det er interessant å notere at enkelte personer oppgir at de har en opplevelse av at det er mye støv i rommet, men at de ikke plages av dette. Uformelle samtaler med klatrere i løpet av arbeidet både i Trondheim Klatresenter og i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter har indikert en utbredt holdning i miljøet til at støv i inneluften i klatreanlegg er "en del av sjarmen" med klatring. Resultatene fra denne spørreundersøkelsen kan tyde på at tre av 11, eller 27,3 %, av personene som oppholdt seg i klatrehallen i undersøkelsens gjennomføringsperiode har denne innstillingen. Det kan også ligge andre årsaker bak det at personene ikke plages av svevestøv, til tross for at de har en opplevelse av at det er mye av det i lokalet.

Respondenter hadde til slutt muligheten til å gi utfyllende kommentarer relatert til inneklima i klatrehallen. De følgende kommentarene ble gitt:

- *"Kløe i øyne, tørr munn. Kalk-forbud! Helt unødvendig. Har aldri brukt det inne. Erfaren klatrer."*
- *"Når det er mye folk her ja. Mye støv fordi de kalker. Jeg bruker aldri kalk inne. Kan være kalkforbud her som andre steder."*
- *"Tørr i halsen."*
- *"Jeg har lest om kalkindusert lungefibrose og er skeptisk til å oppholde meg her for lenge."*
- *"Det er kalk som setter seg i øyet."*

Samtlige kommentarer dreier seg om ubehag relatert til støv fra klatrekalk. Resultatene fra spørreundersøkelsen som helhet indikerer at klatrerne i stor grad er fornøyde med det termiske miljøet i klatrehallen. Både resultatet av PMV/PPD-testen og manglende kommentarer relatert til termisk komfort underbygger dette. Når det kommer til atmosfærisk inneklima indikerer resultatene større grad av misnøye. Nesten halvparten av respondentene oppga at de opplever at det er mye støv i luften, og i en tredjedel av alle besvarelsene ble det svart at personen "plages noe" av svevestøv når vedkommende oppholder seg i

lokalet. Kommentarene som ble gitt viser videre at enkelte er skeptiske til bruken av kalk til klatring innendørs, både av helsemessige årsaker og med bakgrunn i opplevd ubehag.

6.2.5 Evaluering av fremgangsmåte for spørreundersøkelse

Spørreundersøkelsen ble utformet med mål om å senke terskelen for å levere en besvarelse, med kun tre enkle spørsmål som skulle besvares ved å krysse av for svaralternativet man var enig i. Undersøkelsen ble gjort enkelt tilgjengelig i lokalet, og kulepennar for besvarelse ble lagt frem. Formålet med tiltakene var å øke deltagelsen og få inn besvarelse fra en høy andel av klatrerne som oppholdt seg i lokalet i perioden undersøkelsen ble gjennomført.

Totalt ble det levert 24 svar på spørreundersøkelsen. Det er ikke kjent hvor mange klatrere som benyttet hallen den aktuelle helgen, men basert på et omtrentlig og generelt overslag fra NTNUI Tindegruppa kan det regnes med at mellom 30 og 50 personer er innom i løpet av perioden torsdag til søndag i en vanlig uke. Det er dermed en mulighet for at en stor andel (24/30 eller 80 %) av de besøkende har besvart undersøkelsen, men like sannsynlig er det at under halvparten (24/50 eller 48 %) har levert besvarelse. I alle tilfeller er 24 besvarelser på en spørreundersøkelse ikke tilstrekkelig til å gi pålitelige resultater uten videre undersøkelser. Hver respondent har stor innflytelse på de gjennomsnittlige svarene, og vil kunne påvirke resultatet uforholdsmessig mye. Eksempelvis krysset 23 personer av i området mellom -1 og 1 på skalaen for termisk komfort, mens én person krysset av for -3, slik at gjennomsnittet ikke gjenspeiler det store flertallets oppfattelse. Dette ble kompensert for i behandlingen av resultatene ved å benytte både gjennomsnitt, median og typetall som sentralt mål.

Andre kilder til misvisende resultater i forbindelse med spørreundersøkelsen kan også identifiseres. Gjennom samtaler med klatrere både i Trondheim Klatresenter og på Dragvoll er det klart at flere ønsker seg enten varmere eller kaldere inneluft, og at flere plages av svevestøv. Dersom en respondent har en antagelse om at negative besvarelser kan føre med seg en endring i innemiljøet vil dette kunne påvirke personen til å overdrive sine svar.

6.3 Energibehov for klatrehallen i Elgesetergate 10 beregnet i SIMIEN

Som beskrevet i kapittel 5 er det blitt utført syv ulike energiberegninger for klatrehallen i Elgesetergate 10 ved hjelp av simuleringsprogrammet SIMIEN. Dette kapitlet presenterer resultatene.

Energiberegninger ble gjort ved to ulike luftmengder og med varierende reguleringsstrategi. I tabell 6.8 og tabell 6.9 presenteres energibruk til de viktigste energipostene, samt utvalgte temperaturdata, for rommet når det ventileres med luftmengde på henholdsvis $45 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{m}^2$ og $35 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{m}^2$.

I tabellene er t_{maks} i driftstiden den maksimale lufttemperaturen som er beregnet å inntreffe i driftstiden i løpet av året. Maksimal lufttemperatur i rommet i løpet av året vil være betydelig høyere (eksempelvis $38,9 \text{ }^\circ\text{C}$ for simulering 1), men dette inntreffer i løpet av sommerferien, på et tidspunkt hvor lokalet er stengt og ventilasjonsanlegget ikke er i drift. I alle tilfellene hvor luftmengden reguleres for å holde temperaturen under $22,0 \text{ }^\circ\text{C}$ er t_{maks} i driftstiden $23,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Anlegget klarer altså ikke å holde lufttemperaturen

Tabell 6.8: Resultater fra energiberegning av klatrehallen i Elgesetergate 10 ved maksimal luftmengde på $45 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{m}^2$.

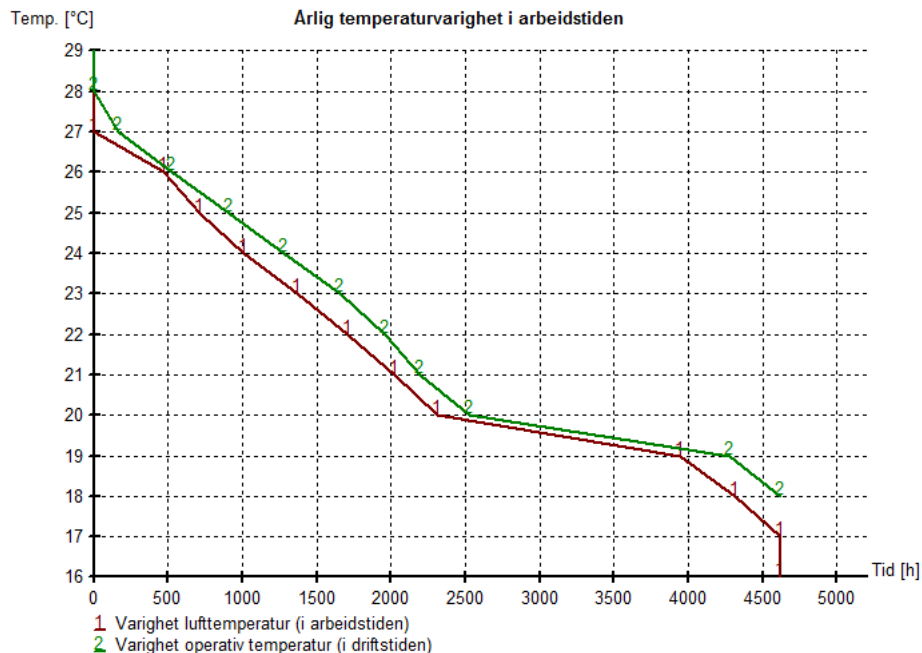
Reguleringsstrategi	t < 22,0 °C	t < 26,0 °C	t < 22,0 °C og CO ₂ < 1000 ppm
Energipost			
Romoppvarming [kWt/m ²]	51,7	51,1	51,7
Ventilasjonsvarme [kWt/m ²]	22,6	21,7	22,6
Ventilasjonskjøling [kWt/m ²]	4,1	2,6	4,1
Vifter [kWt/m ²]	17,6	11,7	17,6
CO ₂ -utslipp [kg/m ²]	45,3	42,0	45,3
Temperaturdata			
t _{maks} i driftstiden [°C]	23,3	26	23,3
Antall timer hvor t _{op} > 26,0 °C	14	529	14

Tabell 6.9: Resultater fra energiberegning av klatrehallen i Elgesetergate 10 ved maksimal luftmengde på $35 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{m}^2$.

Reguleringsstrategi	t < 22,0 °C	t < 26,0 °C	t < 22,0 °C og CO ₂ < 1000 ppm	t < 22,0 °C med nattkjøling
Energipost				
Romoppvarming [kWt/m ²]	51,7	51,1	51,7	51,7
Ventilasjonsvarme [kWt/m ²]	22,5	21,7	22,5	22,5
Ventilasjonskjøling [kWt/m ²]	4,0	2,6	4,0	4,0
Vifter [kWt/m ²]	17	11,7	17	17,1
CO ₂ -utslipp [kg/m ²]	45,0	42,0	45,0	45,0
Temperaturdata				
t _{maks} i driftstiden [°C]	23,8	26	23,8	23,8
Antall timer hvor t _{op} > 26,0 °C	16	529	16	14

under den ønskede grensen gjennom alle årets driftstimer for luftmengdene brukt i simuleringene. Det ble gjort en testsimulering med en luftmengde på $76 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{m}^2$ ($20 \cdot 160 \text{ m}^3/\text{t}$ som beregnet i formel 5.5) for å undersøke hvorvidt det er mulig å oppfylle temperaturkravet uten annen kjøling enn gjennom ventilasjonsanlegget. Resultatet av denne simuleringen viste at maksimal lufttemperatur i driftstiden fremdeles var 23,3 °C, og ventilasjonskjøling alene er dermed ikke tilstrekkelig for å overholde et krav om at temperaturen ikke skal overstige 22,0 °C, selv ved svært høy luftmengde.

Antall timer hvor den operative temperaturen i rommet overstiger 26,0 °C i driftstiden er også oppgitt i tabell 6.8 og tabell 6.9. På dette punktet viser simuleringene svært store forskjeller som følge av endret reguleringsstrategi. Klatrehallen har totalt 4620 driftstimer i løpet av et år. Med regulering for å holde lufttemperaturen under 26,0 °C overstiger operativ temperatur den samme grensen i 529 timer, eller 11,5 % av driftstimene, for både den høyeste og den laveste maksimale luftmengden. Tilsvarende er antall timer med operativ temperatur over 26,0 °C henholdsvis 14 (0,30 %) og 16 (0,34 %) for høyeste og laveste luftmengde når luftmengden reguleres for å holde temperaturen under 22,0 °C. I figur 6.20 er

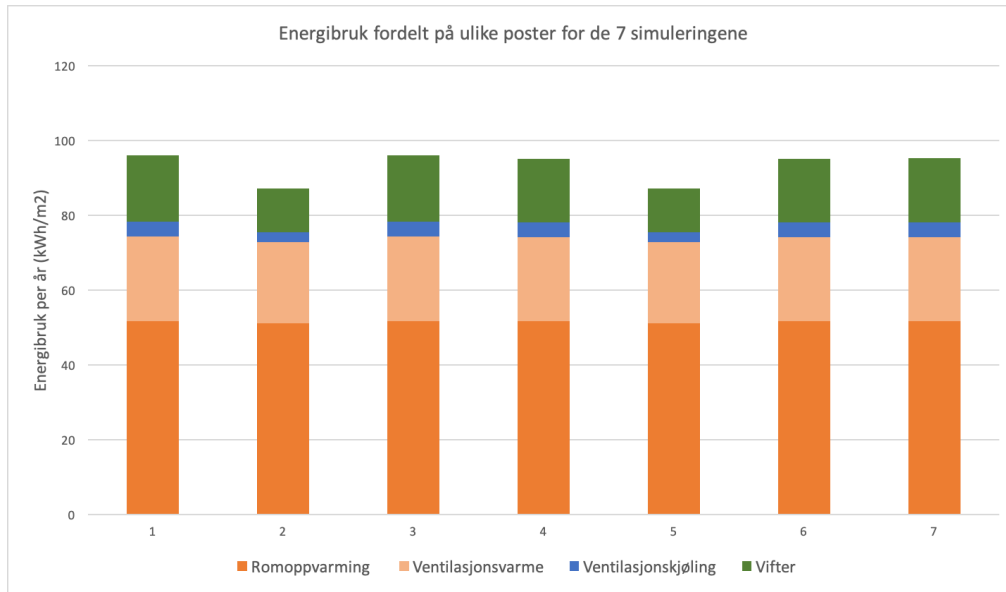


Figur 6.20: Varighetskurve for operativ temperatur og lufttemperatur i klatrehallen i Elgesetergate 10, når det ventileres med en luftmengde på $45 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{m}^2$ som reguleres for å holde lufttemperaturen under $26,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Resultatet er hentet fra energiberegninger for klatrehallen i Elgesetergate 10 utført i SIMIEN.

varighetskurven for lufttemperatur og operativ temperatur i driftstiden for simulering 2 (luftmengde på $45 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ og regulering for å holde lufttemperaturen under $26,0 \text{ }^\circ\text{C}$) presentert. Det er interessant å notere at varighetskurven for operativ tempertur ligger høyere enn kurven for lufttemperatur gjennom alle driftstimene; dette resultatet tyder på at stråling har en merkbar innvirkning. Det kan derfor ikke regnes med at solinnstråling har liten effekt på temperaturen i lokalet selv om fasadene er vendt mot nord og vest, og dermed vil ha direkte innstråling relativt få timer i løpet av året.

Som tabellene viser har ikke endring av luftmengde eller reguleringsstrategi ført til store utslag på beregnet energibruk. Figur 6.21 illustrerer hvordan energibruken i løpet av året fordeler seg på de viktigste energipostene. Merk at ikke alle energiposter er tatt med her; energibruk til belysning og teknisk utstyr er utenfor denne oppgavens omfang, og er dermed ikke relevant. Summen av de inkluderte energipostene er derfor ikke det totale netto energibehovet, men det totale netto energibehovet til energiposter som anses å ha relevans i besvarelsen av oppgavens problemstillinger.

Figur 6.21 viser en nesten konstant sum av energibruk til de relevante energipostene for simuleringene 1, 3, 4, 6 og 7, og noe lavere for simulering 2 og 5. Som beskrevet i kapittel 5 er simulering 2 og simulering 5 utført med et mindre strengt krav til maksimal lufttemperatur, på $26,0 \text{ }^\circ\text{C}$ istedenfor $22,0 \text{ }^\circ\text{C}$, og det er det senkede kravet som har utslag på beregnet energibruk til ventilasjonskjøling og vifter. Energibruk til energipostene for oppvarming forblir tilnærmet uendret gjennom alle simuleringene. Heller ikke aktivisering av nattkjøling synes å ha en innvirkning på energibruken; posten for ventilasjonskjøling er den samme som i simulering 4, som var identisk med unntak av nattkjølingsmuligheten. I testsimuleringen



Figur 6.21: Energibruk til romoppvarming, ventilasjonsvarme, ventilasjonskjøling og vifter for de syv ulike simuleringene av energibehov for klatrehallen i Elgesetergate 10.

som ble utført med en luftmengde på $20\ 160\ \text{m}^3/\text{t}$ ble det beregnet en liten økning i energibruk til vifter, men fortsatt tilnærmet den samme energibruken til de resterende energipostene.

Resultatene viser videre at en endret reguleringsstrategi, fra luftmengderegulering for å holde temperaturen nede til luftmengderegulering både for å holde temperatur og CO_2 -konsentrasjon nede, ikke har utslag på energibruken. For alle energiposter var beregnet årlig energibruk nøyaktig den samme (for samme luftmengde) for de to strategiene. Resultatet viser at det er kjølebehovet som er dimensjonerende for hvilken luftmengde det til enhver tid ventileres med; ikke CO_2 -konsentrasjonen. Det er interessant å vurdere konsekvensene av å sette maksimumskravet til innelufttemperatur såpass lavt som $22,0\ ^\circ\text{C}$, som byggherren har gjort for klatrehallen i Elgesetergate 10. I kapittel 5.3 ble teoretisk nødvendig luftmengde for en dag ved dimensjonerende sommertemperatur beregnet. Varmebelastning fra solstråling og internlast var $34,15\ \text{kW}$, og luftmengden som ble regnet ut var $20\ 160\ \text{m}^3/\text{h}$. På bakgrunn av dette kan nødvendig kapasitet på ventilasjonsaggregatets kjølebatteri regnes ut. Med samme situasjon som i figur 5.4 i kapittel 5.3 kan kjølekapasitet, Q_k , beregnes som vist i formel 6.2.

$$Q_k[\text{kW}] = \dot{V}[\text{m}^3/\text{s}] * \rho_{\text{luft}}[\text{kg}/\text{m}^3] * c_p[\text{kJ}/\text{kg} * \text{K}] * (t_u - t_s)[\text{K}] \quad (6.2)$$

Hvor t_u og t_s er som i figur 5.4.

Med alle verdier innsatt i formel 6.2 resulterer det i en nødvendig kapasitet på kjølebatteriet på $49,9\ \text{kW}$. Det trengs høy luftmengde og kjøleeffekt for å holde lufttemperaturen under $22,0\ ^\circ\text{C}$ gjennom de varmeste sommerdagene, men det kan likevel argumenteres for at det er fornuftig å sette et såpass strengt temperaturkrav. Konklusjonen etter evaluering av resultatene fra spørreundersøkelsen på Dragvoll var at

en lufttemperatur på rundt 18,0 °C gir tilfredshet med de termiske omgivelsene i et rom beregnet for klatreaktivitet, og et mindre strengt temperaturkrav kan derfor føre til at brukerne av rommet opplever temperaturnivået som ubehagelig høyt.

6.4 Usikkerhet og feilkilder i beregning av forventet varme- og kjølebehov for klatrehallen i Elgesetergate 10

I forbindelse med utviklingen av modellen for simulering av energibehovet for klatrehallen i SIMIEN er det gjort flere antagelser og forenklinger. Dette fører til usikkerhet rundt resultatenes nøyaktighet, og resultatene kan ikke betraktes som annet enn relativt grove estimater for hva det reelle energibehovet vil være.

Beregningene av omgivelsenes skjerming på fasadene mot nord og øst var basert på avstander målt i Google Maps, samt overslag av skjermende objekters høyde ved hjelp av samme verktøy. Avstandene er hentet fra satelitt-bilder, og kan ansees å være relativt nøyaktige, men anslått høyde på omkringliggende bygninger og trær betraktes som usikker. Videre er alle arealer på innvendige vegger og fasader anslått ved hjelp av Solibri, et verktøy for innsyn i tredimensjonale bygningsinformasjonsmodeller (BIM). Den nåværende 3D-modellen for Elgesetergate 10 ble utarbeidet i en tidlig fase av prosjektet, og det må regnes med at dimensjoner både innvendig og utvendig vil endres opptil flere ganger før bygningen står ferdig. Arealene brukt i SIMIEN-modellen i denne oppgaven er derfor høyst veiledende.

Normerte varmetilskudd fra internlaster, som gitt i standarden NS 3701, er benyttet i energiberegningene. Normene gjelder generelt for bygg som hører til i kategorien idrettsbygninger, og favner derfor om et bredt spekter av ulike rom som eksempelvis svømmehaller, gymsaler, rom for styrketrening og rom for yoga. Generelle normer som gjelder for rom med svært ulik funksjon vil ikke være like nært reelle belastninger for alle bygnings- og romtyper. Det antas derfor at det kan ligge en betydelig grad av usikkerhet i verdiene for varmetilskudd brukt i SIMIEN-modellen.

Antagelsene og forenklingene som er benyttet i utviklingen av SIMIEN-modellen for beregning av klatrehallens energibehov bidrar til stor usikkerhet. Resultatene kan ikke regnes som nøyaktige "fasitsvar" på rommets fremtidige energibruk, men som veiledende overslag for energibehovet til en klatrehall med utformingen og dimensjonene som er planlagt i Elgesetergate 10.

Kapittel 7

Diskusjon

I dette kapitlet blir resultatene presentert i forrige kapittel diskutert i lys av relevant teori og med fokus på problemstillingene oppgaven tar sikte på å besvare. Interessante funn fra målingene av de ulike innklimaindikatorerne både i Trondheim Klatresenter og i klatrehallen på Dragvoll, samt fra spørreundersøkelsen utført på Dragvoll, drøftes i forbindelse med ulike ventilasjonsløsninger. Resultatene fra energiberegninger utført med simuleringsprogrammet SIMIEN vil være en del av diskusjonsgrunnlaget. Gjennom kapitlet gjøres det en vurdering av hvilket av de vanligste ventilasjonsprinsippene som er best egnet til å sikre et godt inn klima i den planlagte klatrehallen i Elgesetergate 10, både med tanke på termisk komfort og atmosfærisk miljø.

Lokaler for innendørs klatreaktivitet kan utformes på mange ulike måter, og utfordringer med tanke på å oppnå et godt inn klima vil variere med blant annet bruksmønster og personbelastning, men også med ventilasjonsanleggets dimensjonering og egnethet til lokalet. Det er store forskjeller mellom eksisterende klatreanlegg, men det finnes enkelte fellestrekk. Romhøyden i lokaler beregnet for klatreaktivitet er stor, og som beskrevet i kapittel 2.2.2 kan stor avstand fra gulv til tak føre med seg utfordringer relatert til termisk komfort. Felles for de fleste innendørs klatreanlegg er også høy grad av luftforurensning fra interne kilder, ettersom det benyttes magnesiumkarbonat til avfukting av håndflatene. Håndtering av svevestøv fra klatreaktivitet vil gås nærmere inn på i kapittel 7.2. I kapittel 7.1 fokuseres det på hvordan den planlagte klatrehallen i Elgesetergate 10 best kan ventileres for å sikre termisk komfort for klatrende studenter.

7.1 Termisk komfort i innendørs klatreanlegg

For at den planlagte klatrehallen i Elgesetergate 10 skal være et attraktivt sted for studenter å oppholde seg er det viktig at inn klimaet oppleves som behagelig. En avgjørende faktor for hvorvidt personer trives i et rom er den opplevde termiske komforten; det må ikke være verken for kaldt eller for varmt. I rom beregnet for fysisk aktivitet og trening er det spesielt viktig at det ikke er for varmt, ettersom et høyt aktivitetsnivå fører til at lavere omgivelsetemperatur enn normalt oppleves som komfortabelt. Byggherren har satt som krav at temperaturen i klatrehallen i Elgesetergate 10 ikke skal være under 18,0 °C, og ikke skal overstige 22,0 °C.

7.1.1 Observert termisk miljø i undersøkte lokaler

Temperaturmålingene utført i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter, sammen med resultatene fra spørreundersøkelsen gjennomført samme sted, kan gi en indikator på hvilket temperaturnivå som vil gi lavest mulig andel misfornøyde. Som presentert i kapittel 6.2.4 viste resultatene av spørreundersøkelsen en PPD-verdi på 5,08 % eller 5,0 %, avhengig av type sentralmål som ble benyttet. I begge tilfellene er PPD-verdien svært lav; 5,0 % er det laveste mulige resultatet som kan oppnås. Dette tyder på svært høy tilfredshet med de termiske omgivelsene slik de var da undersøkelsen ble besvart. Den gjennomsnittlige lufttemperaturen i klatrehallens oppholdssone for stående personer i tidsrommet spørreundersøkelsen ble besvart ble målt til å være 18,07 °C. Ved en temperatur på rundt 18,0 °C i den nederste delen av rommet i en innendørs klatrehall kan det dermed forventes at de fleste vil være fornøyde med sine termiske omgivelser.

Klatrehallen på Dragvoll idrettssenter er utført med ventilasjon basert på fortregning, og det forventes at temperaturen stiger med høyde over gulvet. Høyere temperatur oppover langs klatreveggen enn på gulvnivå kan ha påvirket respondentenes tilfredshet med lokalets temperaturnivå, men det er ikke gjort luftmålinger høyere opp enn ved omtrent to meters høyde, og det kan derfor ikke sies noe om hvordan temperaturen utvikler seg oppover i rommet.

I Trondheim Klatresenter viste måleresultatene at utviklingen i temperatur målt i avtrekkskammeret, som er representativ for romlufttemperaturen ettersom rommet ventileres med omrøringsventilasjon, henger sammen med utviklingen i utetemperatur. Lokalet er dårlig isolert, og stort varmetap gjennom ytterveggene fører til at temperaturen innendørs synker med synkende utetemperatur, til tross for at det kompenseres ved å øke temperaturen på tilluften. Gjennom den tre uker lange perioden temperaturmålinger i klatresenteret ble utført var den gjennomsnittlige temperaturen i avtrekkskammeret på 18,0 °C, men temperaturen varierer gjennom døgnet og er derfor høyere enn gjennomsnittet i driftstiden og lavere om natten. Figur 6.4 i kapittel 6.1 viser at avtrekkstemperaturen i driftstiden ligger like under eller like over 20,0 °C når utetemperaturen er over frysepunktet, men at når utetemperaturen er under 0 °C er avtrekkstemperaturen i driftstiden rundt 18,0 °C. På det laveste punktet gjennom de tre ukene var avtrekkstemperaturen på 17,3 °C i driftstiden, på et tidspunkt da utetemperaturen var like under 0 °C uten at settpunktet for tilluftstemperatur hadde blitt økt. Dersom det tas utgangspunkt i at en romlufttemperatur på omtrent 18,0 °C er ideelt med tanke på termisk komfort i klatreanlegg, viser målingene gode resultater for Trondheim Klatresenter. Temperaturen i avtrekket varierer mellom 17,0 °C og 20,0 °C i driftstiden. Temperaturvariasjonen skjer innenfor et relativt lite område, og innenfor et temperaturområde som er gunstig med tanke på termisk komfort.

Funn fra langtidsmålinger av temperatur i Trondheim Klatresenter tyder på at lokalet ventileres på en måte som fungerer godt med tanke på å opprettholde et behagelig temperaturnivå for klatrerne som oppholder seg der. Men energibehovet for å opprettholde dette temperaturnivået må tas med i betraktningen. Av figur 6.4 kan det observeres at temperaturen på tilluften holdes på rundt 25,0 °C i driftstiden gjennom de første 11 dagene av temperaturmålingene, for så å stige til 32,4 °C på det høyeste, for å kompensere for lave utetemperaturer. Gjennom den siste uken med målinger varierte tilluftstemperaturen mellom 23,0 °C og 24,0 °C. I kapittel 6.1.1 ble det gjort et enkelt overslag over energibehovet for å varme

opp tilluften til ulike temperaturer for å få et inntrykk av hvilken betydning tilluftens settpunkttemperatur har for anleggets energibruk. En økning i temperaturdifferanse hadde stort utslag på energibehovet til oppvarming av tilluften; over dobbelt så mye energi kreves for å varme luften fra temperaturnivået etter varmegjenvinneren til 27,4 °C som til 19,0 °C over en periode på åtte timer. Beregningen er svært forenklet og må anses som et grovt overslag fremfor en presis energiberegning, men resultatet illustrerer likevel utslaget det får på energibudsjettet å varme opp tilluft til såpass høye temperaturer som det gjøres i Trondheim Klatresenter. Det må bemerkes at sammenligningen ikke tar hensyn til at luft tilført ved 19,0 °C ofte må varmes opp lokalt i rommet, eksempelvis med radiatorer eller vannbåren varme i gulv eller vegger. Dermed blir det totale energibehovet til oppvarming av romluft høyere enn det som fremkommer i tabell 6.1.

Resultatene av energiberegning for klatrehallen i Elgesetergate 10 over et år viste at energipostene romoppvarming og ventilasjonsvarme har betydelig større innvirkning på det totale energibudsjettet enn energiposten ventilasjonskjøling. For simulering 1 var energibehov til romoppvarming og ventilasjonsvarme på henholdsvis 51,7 kWt/m² og 22,6 kWt/m², mens energibehovet til ventilasjonskjøling bare var på 4,1 kWt/m² (se tabell 6.8). Figur 6.21 illustrerer forholdet mellom energibehov til oppvarming og til kjøling. Den store forskjellen antas å skyldes at det i løpet av et år i Trondheim er flere timer med oppvarmingsbehov enn med kjølebehov, samt at klatrehallen har yttervegger utført i glass, som selv ved bruk av høykvalitets glass vil føre med seg store varmetap når temperaturdifferansen over ytterveggen blir stor. Samtidig viste beregningene at ventilasjonskjøling alene ikke var tilstrekkelig til å håndtere kjølebehovet gjennom alle årets driftstimer, uten en overdimensjonering av kjølebatteriet. Ettersom det gjennom året er oppvarmingsbehovet som dominerer energiregnskapet vurderes det å være unødvendig å dimensjonere kjølebatteriet med en effekt som er tilstrekkelig til å kjøle ned romluften til kravet på 22,0 °C på de varmeste dagene om sommeren. Praktiske og økonomiske hensyn, samt krav om lav energibruk, bør vektas tyngre enn et absolutt temperaturkrav. Dersom det aksepteres at inneluftens maksimale temperatur er på 26,0 °C viser energiberegningene at energibehov til ventilasjonskjøling går ned fra 4,1 kWt/m² til 2,6 kWt/m². Beregningene viser riktignok også at denne reguleringsstrategien fører med seg uakseptabelt høyt temperaturnivå. Antall timer hvor operativ temperatur i driftstiden overstiger 26,0 °C i løpet av året var 529 for simulering 2 (regulering for å holde temperaturen under 26,0 °C).

Klatrehallen har et jevnt oppvarmingsbehov gjennom store deler av året, og et høyt kjølebehov i relativt sett få timer. Ventilasjonsanlegget som forsyner klatrehallen bør være i stand til å dekke en andel av oppvarmingsbehovet, og samtidig være dimensjonert for høye nok luftmengder og stor nok kjøleeffekt til å holde romlufttemperaturen under 22,0 °C i det meste av driftstiden. I praksis vil det måtte aksepteres at temperaturen i et lite antall timer i løpet av året overstiger grenseverdien, ettersom det er lite hensiktsmessig å installere stor nok kjølekapasitet til å håndtere maksimalt effektbehov til kjøling i driftstimene med høyest utelufttemperatur. En overdimensjonering av kapasitet kan føre til at anleggets funksjon ved lavere enn maksimal belastning, som vil være tilfelle i store deler av driftstiden, blir dårlig. I et system dimensjonert for svært høy maksimal luftmengde kan det risikeres blant annet at spjeldregulering blir mindre presis og at varmegjenvinnerens virkningsgrad blir lavere enn prosjektert i perioder hvor luftmengdebehovet er lavt. Fysisk plassbruk til kanaler er også et viktig aspekt å ta hensyn til.

7.1.2 Ventilasjonsløsning for termisk komfort i klatrehallen i Elgesetergate 10

Energiberegningene er utført i SIMIEN. Programmet antar i alle beregninger at ventilasjonsanlegget baseres på omrøringsventilasjon, og at luften i rommet som simuleres er fullstendig blandet (ideell omrøring). Avtrekkstemperaturen vil derfor i den simulerte situasjonen være den samme som romtemperaturen. Dersom det tenkes en situasjon hvor det samme rommet ventileres med fortrenningsventilasjon, vil det for tilsvarende luftmengde oppnås samme avtrekkstemperatur som ved omrøringsventilasjon. Ettersom rom ventilert med fortrenningsventilasjon har en positiv temperaturgradient vil lufttemperaturen på gulvnivå derimot være lavere. Luftkvaliteten i oppholdssonen lavt i rommet vil også være bedre ved fortrenningsventilasjon enn ved omrøringsventilasjon, ettersom den stigende varme luften tar med seg luftforurensning opp til den forurensede sonen. Ved å gå over fra omrøringsventilasjon til fortrenningsventilasjon kan man ved samme luftmengde oppnå lavere temperatur og bedre luftkvalitet i oppholdssonen. Dette kan betraktes som en direkte gevinst for rommets inneklima, men åpner også for muligheten til å redusere luftmengden, og dermed oppnå samme temperatur og luftkvalitet som ved omrøring, men ved en lavere energibruk. Ytteligere energigevinst kan oppnås ved å utnytte frikjøling; kjøling ved hjelp av uteluft i perioder med stor kjølebehov. Frikjøling kan benyttes i en lengre periode ved fortrenningsventilasjon enn ved omrøringsventilasjon.

Et av de viktigste motargumentene mot fortrenning som ventilasjonsprinsipp er systemets uegnethet til oppvarming. Spesielt i klima som gir oppvarmingsbehov gjennom store deler av året vil dette være et tungtveiende argument. Energiberegningene viste at for klatrehallen i Elgesetergate 10 er energibehov til oppvarming den dominerende energiposten gjennom et år, og det bør dermed legges til rette for at oppvarmingen av rommet er fleksibel og energieffektiv. Dersom fortrenning velges som ventilasjonsprinsipp må det planlegges en egen oppvarmingsløsning som er egnet til å dekke hele rommets behov for oppvarming. I klatrehallen på Dragvoll er det tatt i bruk radiatorer som varmer opp romluften, og en lignende løsning kan fungere godt i Elgesetergate 10. Radiatorer eller vannbåren varme i veggene kan installeres på rommets laveste nivå, på de to fasadeveggene. Plasseringen av varmekilder på et lavt nivå vil sørge for at romluften i oppholdssonen varmes opp til et nivå som gir termisk komfort. I tillegg er plassering av varmekilder i underkant av kalde overflater, som glassfasadene vil være, et godt tiltak for å motvirke kaldras. Som beskrevet i kapittel 2.2.2 vil de store, kalde fasadene ellers kunne føre til at kald luft strømmer ned i oppholdssonen, og dermed utgjør en risiko for ubehagelig trekk i den nederste delen av rommet.

Et mulig alternativ er å utforme ventilasjonsanlegget basert på fortrenning med tilluftstilførsel ovenfra. Denne løsningen muliggjør oppvarming av ventilasjonsluften og kan være en måte å kombinere fordelene ved omrøring og fortrenning. På denne måten kan energibruk til kjøling om sommeren reduseres, og i perioden av året med oppvarmingsbehov kan ventilasjonsluften varmes før tilførsel til rommet. Løsningen forventes også å kunne gi bedre termisk komfort om sommeren enn et system basert på omrøringsventilasjon vil kunne klare. Energiberegningene i SIMIEN viste at selv ved svært høy luftmengde klarer ikke ventilasjonsanlegget alene å holde romlufttemperaturen under 22,0 °C på de varmeste dagene når det antas ideell omrøring. Dette kan skyldes delvis at rommet har svært stort volum, og når lufttemperaturen er tilnærmet den samme på alle punkter i rommet må store mengder luft kjøles ned. Med fortrenningsventilasjon kan den store romhøyden utnyttes ved at varm luft "lagres" i den øverste delen

av rommet; man får en lagdeling av romluften. Dermed må en mindre mengde luft kjøles ned, og det oppnås en energigevinst. Dersom lagdeling av romluften utnyttes til å redusere kjølebehovet om sommeren, vil temperaturen i de øvre delene av rommet bli høyere, og det må sikres at rommets vertikale temperaturgradient ikke forårsaker negativ opplevelse av det termiske miljøet.

Klatreaktivitet er rommets sentrale bruksområde, og dersom det er for varmt å oppholde seg i høyden har man ikke klart å utforme et anlegg som bidrar til at rommet fyller sin funksjon. I kapittel 2.2.2 ble "50 %-regelen" og "33 %-regelen" for rom ventilert ved fortregning presentert. Reglene beskriver temperaturutvikling som funksjon av høyde over gulvet, og sier at for rom med stor takhøyde skjer en større andel av temperaturøkningen mellom gulvnivå og avtrekk, sammenlignet med for rom med lav takhøyde. Endringen i temperatur per meter man beveger seg opp på klatreveggen vil derfor være høy i klatrehallen, som planlegges med en takhøyde på 14–17 meter, og man risikerer at temperaturøkningen oppleves som ubehagelig. Likevel kan det argumenteres for at det er viktigere å oppnå termisk komfort på gulvnivå enn høyt oppe i rommet. Klatrere oppholder seg i øvre del av klatreveggen en andel av tiden, men det forventes at flest timer blir tilbragt på rommets gulvnivå. Mye tid i klatrehallen går med på å planlegge ruter og til å sikre andre klatrere. Mange vil også benytte seg av buldresonen, eller oppholde seg i lokalet som tilskuere, og personene dette gjelder vil alltid holde seg på gulvnivå.

I valg av ventilasjonsprinsipp til klatrehallen må både hensyn til termisk komfort og atmosfærisk miljø, samt andre faktorer som støybegrensning, energibesparelser, økonomiske hensyn og bruk av plass til kanaler og ventiler vurderes mot hverandre. Termisk komfort må sikres for personer som oppholder seg i rommet i så stor grad som mulig, uten at hensynet fører med seg uakseptabelt høy energibruk til oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft. Klatrehallen i Elgesetergate 10 vil på grunn av store vindusflater ha et stort varmetap og medfølgende oppvarmingsbehov om vinteren, og høy solinnstråling som fører til stort kjølebehov om sommeren. Ventilasjonsanlegget må utformes på en måte som gjør det i stand til å holde lufttemperaturen i lokalet på et nivå som gir fornøyde brukere gjennom hele året.

Fortrengningsventilasjon egner seg overlegent best for rom med stort kjølebehov, men om vinteren kan lagdeling av romluften føre til et økt behov for oppvarming av luften i den nederste delen av rommet. Dette er svært uheldig i tilfellet med klatrehallen i Elgesetergate 10, ettersom energiberegninger viste at energibruk til oppvarming er dominerende i det årlige energibudsjettet. Om sommeren vurderes det at ventilasjon ved fortregning vil være en gunstig løsning med hensyn både til inneklima og energibruk, ettersom et slikt system vil kunne levere kjøling av luft i oppholdssonen ved lav luftmengde.

Et anlegg basert på omrøring gir mulighet for oppvarming av ventilasjonsluften, men medfører økt luftmengdebehov sammenlignet med fortrengningsventilasjon. Om sommeren vil et anlegg basert på omrøringsventilasjon sannsynligvis ikke klare å holde lufttemperaturen under det ønskede nivået gjennom alle årets driftstimer. Om vinteren må behovet for oppvarming dekkes, og det vil være en fordel å kunne benytte ventilasjonsluften til oppvarmingsformål. Et system basert på omrøring gir denne muligheten, men det forventes at store luftmengder trengs for å sørge for tilstrekkelig ventilering og oppvarming av romluft med et anlegg som etterstreber å oppnå fullstendig omrøring. Luftstråler vil måtte tilføres rommet ved stor hastighet for å være i stand til å sette et såpass stort luftvolum i bevegelse. Luft i høy hastighet gjennom kanaler og ventiler produserer mye støy, og vil kunne føre til vanskeligheter med å overholde støykrav. I praksis vil støy fra ventilasjonsanlegget neppe være til stor sjenanse i klatrehallen, ettersom

rommet vil ha et høyt aktivitetsnivå, men lydkravene fra TEK17 må likevel overholdes. I tillegg gir høy lufthastighet i kanaler risiko for støy i tilstøtende rom.

På bakgrunn av resultatene både fra målinger av temperatur i eksisterende klatreanlegg, og simuleringer av forventet energibehov til ulike energiposter for klatrehallen i Elgesetergate 10, anses en ventilasjonsløsning basert på fortregning med tilførsel av tilluft ovenfra som den best egnede løsningen med tanke på å tilfredsstille krav til termisk komfort i den planlagte klatrehallen. I perioden med kjølebehov muliggjør en slik løsning utnyttelse av fordelene ved fortrenningsventilasjon; lagdeling av romluften gjør det mulig å oppnå lav temperatur i oppholdssonen selv ved lave luftmengder, og utvidet mulighet for utnyttelse av frikjøling gir ytterligere energibesparelser. Samtidig vil det være en fordel at ventilasjonsanlegget kan bidra til oppvarming av lokalet vinterstid. Med tilførsel ovenfra er ikke fortrenningsventilasjonsanlegget avhengig av at tilluften tilføres ved undertemperatur for å fungere, og et slikt anlegg vil kunne dekke en andel av klatrehallens oppvarmingsbehov. Dette systemet forventes å være i stand til å sikre behagelig innelufttemperatur for klatrere gjennom hele året, og er derfor den anbefalte løsningen med hensyn til termisk komfort. Elgesetergate 10 skal oppfylle strenge krav til energibruk for å oppnå passivhusnivå samt ZEB-O÷EQ-nivå, og et lavt energibehov til ventilasjon må derfor vektlegges. Dette underbygger valget av fortrenningsventilasjon som løsning for klatrehallen, ettersom systemet i prinsippet er mer energieffektivt enn omrøringsventilasjon.

En viktig forutsetning for et energieffektivt ventilasjonsanlegg, uavhengig av hvilket ventilasjonsprinsipp som velges, er at systemet baseres på behovsstyring, som presentert i kapittel 2.5. Luftmengderegulering mellom et fastsatt minimums- og maksimumsnivå på bakgrunn av målte indikatorer vil sørge for at det ikke ventileres unødig, med påfølgende unødig energibruk.

I prosjekteringen av en fortrenningsventilasjonsløsning med tilluftstilførsel ovenfra må det sikres at det ikke oppstår trekk i perioder med kjølebehov som følge av at luft med undertemperatur tilføres oppholdssonen ved større hastighet enn ved konvensjonell fortregning. Tilluft ved lavere temperatur enn romluften trenger ikke like stor bevegelsesmengde for å nå ned til gulvet som tilluft ved høyere temperatur enn romluften, som følge av gravitasjon. En mulig løsning er derfor installasjon av et spjeld i tilluftskanalen, slik at luftmengden kan reguleres opp ved oppvarmingsbehov, og ned ved kjølebehov. utfordringer kan også oppstå relatert til termisk lagdeling med påfølgende økt energibruk til oppvarming i perioder med varmebehov når fortrenningsventilasjon benyttes.

En mulig løsning både på trekkproblematikk og utfordringer relatert til termisk lagdeling er utforming av et kombinert anlegg, hvor fortrenningsventilasjon benyttes i det meste av driftstiden og ventiler for omrøringsventilasjon supplerer med oppvarming i perioder med behov. En slik kombinert løsning forventes å føre til høye investeringskostnader, ettersom det må installeres dobbelt sett av ventiler, spjeld og kanaler. En beregning av kostnads- og energibesparelser i driftsfasen må gjennomføres for å kunne avgjøre hvorvidt et slikt system vil lønne seg.

7.2 Trygg og behagelig luftkvalitet i innendørs klatreanlegg

Et tilfredsstillende termisk miljø alene er ikke tilstrekkelig til å slå fast at man har oppnådd et godt innneklima. Som presentert i kapittel 2.1 har flere faktorer en innvirkning på hvordan klimaet innendørs oppleves, og et sentralt aspekt er et godt atmosfærisk miljø, med romluft som er, i så stor grad som mulig, fri for ubehagelig eller helseskadelig luftforurensning. Målinger i lokalene til Trondheim Klatresenter og i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter viste høye konsentrasjoner av svevestøv i form av fine partikler, og ved Trondheim Klatresenter ble det også oppdaget forhøyede konsentrasjoner av CO₂ gjennom store deler av driftstiden. Svevestøv vurderes å utgjøre den største risikoen for det atmosfæriske miljøet i klatrehallen i Elgesetergate 10, og det bør settes inn tiltak for å forhindre uønsket høye nivå av denne typen luftforurensning. Intern produksjon av CO₂ fra personer vil være lav relativt til rommets store volum, og med et velprosjektert ventilasjonsanlegg forventes ikke store problemer relatert til forhøyet CO₂-konsentrasjon. Likevel anbefales overvåking av CO₂-konsentrasjon, slik at tiltak kan settes inn dersom utfordringer oppstår.

7.2.1 Håndtering av støv fra klatrekalk

I kapittel 2.1.3 ble bruken av magnesiumkarbonat til avfukting av hendene i forbindelse med aktiviteter som klatring og turn, og mulig risiko forbundet med dette, beskrevet. Støvfylt romluft som et resultat av kalkbruk er et velkjent fenomen for personer som oppholder seg mye i innendørs klatreanlegg, men omfanget av, og holdningen til fenomenet varierer.

Folkehelseinstituttet anbefaler en grenseverdi for døgnmiddelkonsentrasjon av fine partikler (PM_{2,5}) på 15 µg/m³. I Trondheim Klatresenter ble det registrert en gjennomsnittlig PM_{2,5}-konsentrasjon på 11,28 µg/m³ gjennom 22 timer, men i løpet av timene av driftstiden med størst personbelastning i lokalet varerte konsentrasjonen mellom rundt 15 µg/m³ og 40 µg/m³. Utviklingen av svevestøvkonsentrasjon ved konstante, stasjonære forhold er interessant å undersøke. Målingene fra Trondheim Klatresenter viste at når det ikke var personer til stede og ventilasjonsanlegget ble driftet med en konstant, lav luftmengde sank konsentrasjonen av svevestøv til et lavt nivå. I løpet av de 60 minuttene mellom kl. 23:00 og kl. 24:00 ble det registrert en tilnærmet lineær utvikling i konsentrasjon fra 15 µg/m³ til 5 µg/m³, før nedgangen flatet ut. Mellom klokken 02:00 og 05:00 sank konsentrasjonen fra omtrent 1,5 µg/m³ til 0,2 µg/m³. Figur 6.11 i kapittel 6.1.3 viser effekten av at luftmengden ble økt klokken 05:00; konsentrasjonen av svevestøv økte brått til nesten 50 µg/m³. En eventuell nedgang i svevestøvkonsentrasjon ble i forkant av luftmålingene forventet å skyldes enten at støvet er tyngre enn den omgivende luften, og derfor synker og legger seg på gulv eller andre overflater, eller at ventilasjonsaggregatets avtrekksfilter fanger opp støvet i luften. Resultatene indikerer at støvet forblir i rommet, men synker og blir liggende på overflatene når luftbevegelsene i rommet er relativt stasjonære. Dersom filteret hadde fanget opp støvet som finnes i rommet ved stengetid i løpet av natten ville man ikke sett den brå økningen i konsentrasjon når luftmengden økes om morgenen.

I klatrehallen på Dragvoll idrettssenter ble betydelig lavere døgnmiddelkonsentrasjoner av PM_{2,5} enn i Trondheim Klatresenter registrert. Det ble gjort målinger i fire døgn, og den høyeste middelkonsentrasjo-

nen i løpet av 22 timer var på $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Klatrehallen på Dragvoll er et lite rom sammenlignet med Trondheim Klatresenter, og antall personer som er til stede og produserer støv fra kalk er følgelig lavere. Men støvet produsert av personene i Trondheim Klatresenter fordeles på et større volum, så det faktisk at det er lavere personbelastning på Dragvoll kan ikke alene forklare den store forskjellen i gjennomsnittlig svevestøvkonsentrasjon. Ventilasjonsanlegget som forsyner klatrehallen på Dragvoll er slått av om natten, og starter opp klokken 06:00 mandag til fredag, og klokken 08:00 lørdag og søndag. I kapittel 6.2.2 ble utviklingen i $\text{PM}_{2,5}$ -konsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll fra torsdag 28. mars til mandag 1. april presentert. Det ble slått fast at høy svevestøvkonsentrasjon var sterkt korrelert med høy CO_2 -konsentrasjon; en sammenheng som var forventet ettersom både CO_2 og støv fra kalk produseres av personer i lokalet, og en høy personbelastning dermed vil føre til en økning av begge indikatorene. I Trondheim Klatresenter ble det registrert en kraftig oppgang i konsentrasjon av svevestøv ved økning av luftmengde tidlig om morgenen. For å undersøke hvorvidt det samme skjedde på Dragvoll ble utviklingen i perioden fra 10 minutter før til 30 minutter etter anlegget ble slått på for de fire dagene 29. mars, 30. mars, 31. mars og 1. april undersøkt. Resultatene er presentert i figurene B.4, B.5, B.6 og B.7 i vedlegg B, og viser at en tilsvarende effekt av å slå på ventilasjonsanlegget ikke registreres i klatrehallen på Dragvoll. Den 29. mars og den 30. mars har derimot aktivering av ventilasjonsanlegget tilsynelatende motsatt effekt; omtrent 15 minutter etter at anlegget slås på registreres det en nedgang i konsentrasjon av svevestøv.

På samme måte som i Trondheim Klatresenter observeres det på Dragvoll en nedgang i svevestøvkonsentrasjon når lokalet er tomt. Mellom klokken 21:40 og klokken 22:40 den 29. mars sank konsentrasjonen fra omtrent $5,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ til $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, det vil si at nedgangen i løpet av den første timen med tomt lokale var over tre ganger så stor for Trondheim Klatresenter som for klatrehallen på Dragvoll. I Trondheim Klatresenter sank konsentrasjonen saktere etterhvert som den ble lavere, og på Dragvoll startet nedgangen på et mye lavere nivå enn i Trondheim Klatresenter. Resultatene viser at konsentrasjonen synker saktere ved lav konsentrasjon enn ved høy, og kan indikere at støv fra kalk består av partikler med ulik masse innenfor fraksjonen $\text{PM}_{2,5}$. De tunge partiklene synker raskt til gulvet, mens de mindre og lettere partiklene forblir i romluften over lengre tid.

Parallelt med luftmålingene i klatrehallen på Dragvoll ble det gjennomført en spørreundersøkelse om inneklimaet i lokalet. På spørsmål om hvorvidt det oppleves som at det er mye støv i luften i rommet svarte nesten halvparten (11 av 24) respondenter ja. Åtte av personene som svarte "ja" svarte videre at de "plages noe" på oppfølgingsspørsmål om hvorvidt man plages av eventuelt støv. Totalt åtte av 24 respondenter plages altså i noen grad av høy konsentrasjon av svevestøv i klatrehallen, og tre personer synes det er mye støv i lokalet uten at de plages av dette. Fem personer benyttet også muligheten til å gi en utfyllende kommentar; samtlige av disse omhandlet plager relatert til støv. Kommentarene beskrev kløe i øyne og tørrhet i hals og munn, og to av respondentene oppga at de ønsker et kalk-forbud innendørs. Til tross for at målingene av $\text{PM}_{2,5}$ viste konsentrasjoner langt under grenseverdien har enkelte av klatrerne på Dragvoll en negativ opplevelse av støvkonsentrasjonen i lokalet. Dette resultatet bygger opp under antagelsen om at en stor andel av støvpartiklene som produseres i forbindelse med klatreaktivitet har større diameter enn $2,5 \mu\text{m}$, og dermed ikke fanges opp av måleapparatet som er benyttet.

Det er blitt undersøkt hvorvidt en sammenheng mellom luftens fuktighet og konsentrasjonen av svevestøv kan identifiseres. Klatrekalk har som funksjon å trekke til seg fuktighet, og det kunne derfor i forkant av

målingene settes frem en hypotese om at økt luftfuktighet fører til at støvpartiklene tiltrekker seg fukt fra luften, blir tyngre og synker til gulvet, med påfølgende nedgang i svevestøvkonsentrasjonen. En slik sammenheng har derimot ikke blitt funnet i målingene som er gjort. Både relativ luftfuktighet og konsentrasjon av svevestøv henger sammen med personbelastning, og denne korrelasjonen synes å dominere over en eventuell sammenheng mellom svevestøv og luftfuktighet.

7.2.2 CO₂-nivå i undersøkte lokaler

Innendørs CO₂-konsentrasjon er en god indikator for personbelastningen i et rom, og en parameter det ofte reguleres etter i ventilasjonsanlegg. Forhøyet CO₂-nivå fører til nedsatt produktivitet og trivsel, og Folkehelseinstituttet anbefaler derfor at konsentrasjonen innendørs ikke overstiger 1000 ppm.

I forbindelse med luftmålingene gjort i Trondheim Klatresenter ble det oppdaget til dels svært høyt nivå av CO₂ i lokalet. I perioden ventilasjonsanlegget ble driftet med omluft ble det registrert en jevn stigning i konsentrasjon i løpet av dagen, til et toppunkt klokken 18:00 med CO₂-nivå på over 2200 ppm. Ved overgang til drift med friskluftinntak til ventilasjonsanlegget sank konsentrasjonen igjen, men det er verdt å merke seg at CO₂-nivået i lokalet aldri var under 880 ppm i løpet av perioden målingene ble utført. CO₂-målingene utført i ventilasjonsaggregatet av Buch og Jensås kan bidra til å forklare det høye nivået av CO₂ selv ved lav eller ingen personbelastning. Ved drift med omluft og ved drift med friskluft ble det målt henholdsvis 1057 ppm og 1348 ppm CO₂ i tilluftskanalen ut fra ventilasjonsaggregatet. I omluftdrift kan det forventes at CO₂-nivået i tilluften er høyt, ettersom luften er resirkulert romluft som inneholder CO₂ produsert av personene i rommet. Men det er oppsiktsvekkende at det ble målt enda høyere nivå av CO₂ i tilluften når anlegget driftes med tilførsel av friskluft utenfra. Buch og Jensås utførte i etterkant av målingene en undersøkelse av avkastluftens bevegelse etter at den forlater avkastristen på byggets yttervegg. Bildet i figur 4.2 i kapittel 4.1.1 viser hvordan avkastristen og inntaksventilen er plassert i forhold til hverandre. Buch og Jensås oppdaget ved hjelp av røyk tilført avkastluften at det oppstår en kortslutning mellom avkast og inntak, spesielt når vindretningen går fra avkastristen mot inntaksventilen. En stor andel av luften trekkes inn i inntaket igjen, og dermed benyttes omluft til en viss grad selv i perioder med høy personbelastning og stort behov for tilførsel av frisk luft med lavt CO₂-nivå.

I klatrehallen på Dragvoll idrettssenter varierer ikke luftmengden det ventileres med, men holdes konstant gjennom driftstiden. Variasjoner i CO₂-konsentrasjon henger derfor kun sammen med antall personer som oppholder seg i lokalet. Målingene som ble utført i klatrehallen viste en CO₂-konsentrasjon som varierte mellom rundt 410 ppm på det laveste, i perioder hvor det ikke er personer tilstede i rommet, til mellom 700 ppm og 800 ppm i perioder med høy personbelastning. Nivået ligger gjennom hele perioden målingene ble utført godt innenfor Folkehelseinstituttets anbefaling om maksimal konsentrasjon på 1000 ppm.

Resultatene av energiberegningene fra SIMIEN for klatrehallen i Elgesetergate 10 viste identisk energibehov for alle energiposter for de to tilfellene luftmengderegulering med hensyn på temperatur og CO₂, og luftmengderegulering kun med hensyn på temperatur, når temperaturkravet var satt til maksimalt 22,0 °C og grensen for CO₂-konsentrasjon var satt til 1000 ppm. Resultatet indikerer at temperatur alltid vil være den avgjørende faktoren når regulatoren avgjør hvilken luftmengde som skal leveres til rommet til

enhver tid. Det er likevel gode argumenter for å inkludere følere for både temperatur og CO₂ i lokalet. CO₂ er en god indikator på hvor mange personer som befinner seg i et rom, ettersom mennesker produserer CO₂ ved respirasjon. Fordelen ved luftmengderegulering basert på sammenligning av et ønsket og et målt CO₂-nivå er dermed at systemet muliggjør trinnløs regulering av luftmengden basert på den faktiske personbelastningen i et rom. Det er også et krav fra byggherren om at regulering av luftbehandlingssystemene skal styres av både CO₂ og temperaturnivå.

7.2.3 Ventilasjonsløsning for inneluftkvalitet i klatrehallen i Elgesetergate 10

Ulike ventilasjonsprinsippers styrker og svakheter med hensyn på å oppfylle krav til termisk komfort ble diskutert i kapittel 7.1. Ventilasjonsanlegget må også sørge for at luften klatrerne puster inn ikke er helseskadelig, og ikke forårsaker ubehag. I klatrehallen på Dragvoll kom det gjennom en spørreundersøkelse frem at enkelte av respondentene plages av ubehagelig høy konsentrasjon av svevestøv. I tillegg til å levere termisk komfort ved både høyt kjølebehov og høyt oppvarmingsbehov, må ventilasjonsanlegget i klatrehallen i Elgesetergate 10 håndtere utfordringene relatert til en høy intern produksjon av støvpartikler.

En faktor som vil være med på å bestemme ulike ventilasjonsløsningers egnethet til å sikre en akseptabel konsentrasjon av svevestøv i lokalet er støvpartiklens egenskaper. Støvpartikler med stor masse vil synke og legge seg på gulv og andre overflater, selv ved moderate luftbevegelser. De minste partiklene vil kreve mer eller mindre stillestående romluft over lengre tid før de legger seg på en overflate. Dersom det kunne blitt slått fast at hoveddelen av støvpartiklene i klatrehallen vil være tunge nok til å synke uavhengig av romluftens strømming, ville ikke hensynet til fjerning av støv fra luften vært en like betydelig faktor i valg av ventilasjonsløsning. I en slik situasjon ville den høye støvproduksjonen i rommet sannsynligvis i stor grad latt seg håndtere gjennom hyppige og godt gjennomtenkte rengjøringsrutiner. Det forventes at sammensetningen av støvpartikler i klatrehallen i Elgesetergate 10 blir mer sammensatt enn dette. Resultatene fra luftmålinger i Trondheim Klatresenter viste at de registrerte partiklene fordelte seg på flere ulike størrelsesfraksjoner; partikler med diameter i spekteret fra under 0,3 μm til mellom 5 μm og 10 μm ble registrert. Dermed må det i ventilasjonsanleggets utforming tas høyde for at løsningen må håndtere støvpartikler i ulike størrelser. Resultatene viste at 90 % av støvpartiklene har en diameter på under 1 μm . De små partiklene dominerer i antall, og utgjør i tillegg en større helseisiko enn større partikler, ettersom de trenger lenger inn i det menneskelige respirasjonssystemet. Det kan derfor argumenteres for at effektiv fjerning av små partikler bør ha prioritet over fjerning av større partikler, som det er færre av og som utgjør en mindre risiko for helseskader. Samtidig må det tas hensyn til hvordan personer som oppholder seg i klatrehallen opplever støvbelastningen. Det antas at støvpartiklene i de øvre størrelsesfraksjonene er til større sjenanse enn fine partikler fordi størrelsen vil føre til at de er merkbare når de setter seg i øyne og munn, og det faktum at partiklene er store nok til at de er synlige forventes å øke opplevelsen av støvfyllt romluft. Det forventes at sammensetningen av støvpartikler i klatrehallen i Elgesetergate 10 vil tilsvare den som ble registrert i Trondheim Klatresenter, ettersom svevestøv i begge lokalene i stor grad vil skyldes bruk av klatrekalk. Det vil si at kun 10 % av støvpartiklene forventes å være i de øvre ni tidelene av størrelsedistribusjonen, med en diameter på over 1 μm , mens den store overvekten av støvpartikler vil være mindre enn dette.

I evalueringen av ulike ventilasjonsprinsipper for sikring av termisk komfort i klatrehallen i Elgesetergate 10 ble fordeler og ulemper ved omrøringsventilasjon og fortreningsventilasjon presentert. De to prinsippene har styrker og svakheter også når det kommer til å sikre at svevestøvkonsentrasjonen i rommet holdes på et akseptabelt nivå. Som presentert i kapittel 2.3 karakteriserer forurensningsfjerningseffektivitet (CRE) hvor effektivt ventilasjonsanlegget fjerner luftforurensning fra et rom, og er gitt av forholdet mellom konsentrasjon av forurensning i avtrekksluften og gjennomsnittlig luftforurensning i rommet. Ved omrøringsventilasjon kan det oppnås en CRE på maksimalt 1, når forurensningskonsentrasjonen i avtrekket er den samme som gjennomsnittlig konsentrasjon i rommet, det vil si ved fullstendig omrøring. Korrekt utført fortreningsventilasjon vil gi høyere konsentrasjon av forurensning i avtrekksluften enn den gjennomsnittlige konsentrasjonen i rommet, og dermed en CRE som er større enn 1. En CRE større enn 1 indikerer at luftforurensning effektivt fjernes fra rommet, og at personer som oppholder seg der puster inn luft som er mindre forurenset enn den ville vært ved ideell omrøringsventilasjon. Det er riktignok ikke gitt at fortreningsventilasjon automatisk gir en høy CRE. Oppdriftskraften i konveksjonsstrømmen som dannes rundt varmekilder er stor nok til at små partikler og gasser fraktes opp til avtrekksventilen, men enkelte partikler kan ha stor nok masse til at gravitasjon overvinner oppdriftskreftene, og partiklene blir værende i oppholdssonen. I en slik situasjon kan det risikeres at store støvpartikler som ellers ville blitt liggende på gulvet trekkes opp i pustesonen til personer i rommet, men ikke videre opp til avtrekket, og at forurensningskonsentrasjonen i oppholdssonen blir forhøyet.

Med en ventilasjonsløsning basert på omrøring vil man i mindre grad enn ved fortrenning risikere at store støvpartikler blir fraktet med konveksjonsstrømmer bare delvis opp i rommet, og dermed potensielt fører til dårligere luftkvalitet. Den høye hastigheten i luftstrålene som anvendes ved omrøringsventilasjon vil sørge for at også store partikler settes i bevegelse sammen med romluften, og trekkes ut av rommet gjennom avtrekket. Ulempen er at man ikke oppnår en uforurenset sone i den nederste delen av rommet; ved omrøringsventilasjon vil svevestøv være distribuert tilnærmet jevnt på all romluften, og med høyere konsentrasjon i oppholdssonen enn man kan oppnå med korrekt utført fortreningsventilasjon. Det ble gjennom målingene utført i Trondheim Klatresenter også oppdaget at luftstrålene fra tilluftsventiler for omrøring forårsaker en drastisk økning i svevestøvkonsentrasjon i romluften når ventilasjonsanlegget skifter fra nattdrift til vanlig driftsmodus, og luftmengden økes. Tilluftsventilene og lufthastigheten er dimensjonert for å sette så mye av romluften som mulig i bevegelse, men de store luftbevegelsene drar også med seg støv. I Trondheim Klatresenter støvsuges lokalet hver morgen, etter at ventilasjonsanlegget har skiftet fra nattdrift til vanlig drift. En stor andel av de største støvpartiklene vil i løpet av natten legge seg på gulv og overflater, og rengjøringen om morgenen ville vært langt mer effektiv dersom støvet fortsatt lå på overflater i rommet istedenfor å være spredt rundt i romluften. Dette kan enkelt la seg løse ved å endre tidspunkt for støvsuging eller for overgang til dagdrift, og er i så måte ikke en direkte ulempe ved ventilasjonsprinsippet omrøring. Det er likevel en interessant observasjon, og understreker viktigheten av å ha god kjennskap til ventilasjonsanleggets funksjon, og av å sikre at det i den daglige driften jobbes på lag med bygningens tekniske systemer.

I vurderingen av hvilket ventilasjonsprinsipp som er best egnet til å sikre en sunn og behagelig romluft i klatrehallen i Elgesetergate 10 må flere hensyn veies mot hverandre. Det forventes at en løsning basert på omrøringsventilasjon, på grunn av høy hastighet i luftstrålene, vil kunne fjerne mer av de største støvpartiklene fra oppholdssonen enn man vil kunne oppnå med fortreningsventilasjon. Dette antas å

resultere i en positiv opplevelse av romluften for klatrere som oppholder seg i lokalet, ettersom de største partiklene er mest merkbare. Dersom fortreningsventilasjon, enten konvensjonell eller med tilluftstilførsel ovenfra, velges som løsning, risikeres det at anlegget ikke vil være i stand til å fjerne de største partiklene fra oppholdssonen. Høy konsentrasjon av store partikler vil slå negativt ut på tilfredsheten med den opplevde inneluftkvaliteten. Men helsemessige hensyn må også vektlegges. Det forventes at den overlegent største andelen av støvpartikler fra kalk i klatrehallen vil være små, med en diameter på under 1 μm . Svært små partikler er ikke umiddelbart like merkbare som større partikler, men kan potensielt føre til mer alvorlig skade i menneskers respirasjonssystem. Med fortreningsventilasjon vil de minste støvpartiklene effektivt kunne fjernes fra den nederste delen av rommet, slik at personer som oppholder seg der puster inn luft med en lavere konsentrasjon av små partikler enn de ville gjort dersom rommet var ventilert med omrøringsventilasjon. Resultatene av luftmålinger gjort på Dragvoll idrettssenter viste også at i en klatrehall ventilert med fortrenning kan det oppnås lav konsentrasjon av CO_2 gjennom hele driftstiden.

Uavhengig av hvilket ventilasjonsprinsipp som velges bør det gjøres et bevisst valg av komponenter til anlegget. I avtrekket må det anvendes et filter som er egnet til å fange opp støvpartikler, slik at partiklene ikke blir dratt med videre inn i ventilasjonsaggregatet og forurenses vifter, varmegjenvinner og innsiden av kanalene. Gode rutiner for rengjøring og vedlikehold av avtrekksfilteret må også etableres og følges opp. Ved et anlegg basert på omluft ville oppfangning av partikler vært viktig også med tanke på å ikke overføre støvet tilbake til tilluften, men omluftdrift vurderes å ikke gi akseptabelt inneklima og anbefales derfor ikke. En evaluering av hvilke egenskaper et avtrekksfilter må ha for å være godt egnet til bruk i klatreanleggets ventilasjonsanlegg må gjøres. Dette er utenfor omfanget av denne oppgaven, og vil ikke diskuteres videre her.

Videre må det gjøres en vurdering av hvorvidt det er hensiktsmessig å benytte et separat ventilasjonsaggregat for klatrehallen, eller om et felles aggregat kan forsyne flere av idrettsrommene i den aktuelle delen av bygningen. Et felles ventilasjonsaggregat vil være fornuftig både av økonomiske hensyn og med tanke på å minimere plassbruk til tekniske installasjoner. Men det foreligger gode argumenter for at et separat aggregat på lang sikt vil være fordelaktig. Et felles anlegg fører med seg risiko for at støv fra klatrehallen spres gjennom kanalene, og forurenses både øvrige rom tilknyttet systemet og ventilasjonsaggregat og -kanaler. Videre vil klatrehallens behov for lufttilførsel sannsynligvis være ulik fra behovet i omkringliggende rom, og et separat anlegg øker systemets fleksibilitet med tanke på å variere reguleringsstrategi, luftmengde eller driftstider etter behov. Energisimuleringer har vist stor variasjon i oppvarmings- og kjølebehov i klatrehallen gjennom året, ettersom store glassfasader fører med seg varmetap om vinteren og solinnstråling om sommeren. Med tanke på den varierende varme- og kjølebelastningen forventes det at økt fleksibilitet vil kunne bedre anleggets ytelse og senke energibehovet når et driftsår betraktes under ett. Fordelene av å installere et separat ventilasjonsaggregat for klatrehallen anses å veie tyngre enn hensynet til ekstra kostnader og plassbruk.

Aktive klatrere tilbringer ofte mange timer i innendørs klatreanlegg. Dette forventes også å være tilfelle i klatrehallen i Elgesetergate 10. Det anses å være av stor viktighet å redusere risikoen for at studentene som skal benytte klatrehallen opplever helseplager eller sykdom på lang sikt relatert til innånding av små partikler fra klatrekalk i studietiden. Derfor anbefales det å ventilere klatrehallen med en løsning basert

på fortreningsventilasjon. Denne løsningen er bedre egnet til å redusere konsentrasjonen av små støvpartikler, som potensielt kan forårsake størst skade og som finnes i størst utbredelse i en klatrehall, enn omrøringsventilasjon. I tillegg til fortreningsventilasjon anbefales det at det settes inn inneklimateiltak rettet mot brukere av lokalet. Holdningsskapende arbeid, som eksempelvis plakater i lokalet med oppfordring om å minimere kalkbruk av hensyn til astmatikere og allergikere, kan føre til en bevisstgjøring av utfordringer relatert til ukritisk bruk av klatrekalk.

Kapittel 8

Konklusjon

Denne oppgaven har omhandlet ventilering av klatrehallen i Elgesetergate 10 - en kombinert undervisnings- og idrettsbygning for NTNU og Sit som planlegges oppført i løpet av de kommende årene. Bygget skal oppfylle strenge krav både til energibruk og til inneklima. Ventilasjonsanlegget skal sikre et godt inneklima, og vil samtidig stå for en betydelig andel av bygningens energibruk. En gjennomtenkt utforming av løsninger for ventilering av bygget er derfor essensielt dersom kravene skal innfris.

Flere faktorer må tas hensyn til når et godt inneklima skal oppnås, blant dem termisk komfort og inneluftkvalitet. Klatrehallen i Elgesetergate 10 forventes å ha en høy intern produksjon av støvpartikler, som følge av at klatrere benytter såkalt "klatrekalk" - magnesiumkarbonat i pulverform. Et høyt nivå av støvpartikler vil redusere lokalets inneluftkvalitet, og kan gå ut over helse og trivsel. Det er ikke funnet dokumentasjon på at magnesiumkarbonat i seg selv er skadelig for menneskers helse, men langvarig eksponering for støvpartikler kan føre til skader i det kardiovaskulære systemet og i respirasjonssystemet. De minste støvpartiklene trenger lengst inn i respirasjonssystemet og kan dermed gjøre mest skade, og undersøkelser gjort i forbindelse med denne oppgaven har vist at omtrent 90 % av støvet som produseres i innendørs klatreanlegg består av partikler med en diameter på under $2,5 \mu\text{m}$. Det kan dermed ikke konkluderes med at det er risikofritt å oppholde seg over tid i lokaler hvor klatrekalk benyttes.

Besvarelsene fra en spørreundersøkelse omhandlende inneklima i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter er blitt analysert ved hjelp av Fangers PMV/PPD-modell. Resultatet indikerer at høy grad av tilfredsstillelse med de termiske omgivelsene i innendørs klatreanlegg kan forventes ved en gjennomsnittlig romlufttemperatur på rundt $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Det forventes å være krevende å holde lufttemperaturen på dette nivået i den planlagte klatrehallen når det er høy aktivitet, og dermed høy varmeproduksjon, i rommet. Solinnstråling gjennom store vindusflater vil bidra til å heve temperaturen, og kan føre til ytterligere utfordringer relatert til opprettholdelse av termisk komfort for klatrere i perioder med kjølebehov. Energiberegninger utført i SIMIEN viste at skjerpning av kravet for maksimal romlufttemperatur fra $26,0 \text{ }^\circ\text{C}$ til $22,0 \text{ }^\circ\text{C}$ hadde større utslag på den samlede energibruken enn en økning i maksimal luftmengde.

I vurderingen av en egnet løsning for ventilering av klatrehallen i Elgesetergate 10 er det interessant å betrakte eksisterende løsninger. Undersøkelser er blitt utført i to klatreanlegg i Trondheim. I Trondheim Klatresenter er det installert et enkelt anlegg for omrøringsventilasjon, mens i klatrehallen på Dragvoll

idrettssenter benyttes fortrenningsventilasjon. Det er ikke gjort funn som indikerer at det ene eller det andre prinsippet er foretrukket i eksisterende klatreanlegg. På generell basis er omrøringsventilasjon en vanlig løsning i de fleste typer bygninger, mens fortrenningsventilasjon benyttes i tilfeller hvor rommet som skal ventileres er veldig stort, som teatersaler eller auditorier, eller i tilfeller hvor det kreves svært lav energibruk, eksempelvis i de to Powerhouse-prosjektene Kjørbo og Brattørkaia.

Beregninger av varme- og kjølebehov for klatrehallen i Elgesetergate 10 har vist at når det forutsettes ideell omrøring vil ventilasjonsanlegget ikke være i stand til å holde lufttemperaturen i lokalet under 22,0 °C, som er kravet fra byggherren, i perioder med stort kjølebehov. Ved bruk av fortrenningsventilasjon i rom med kjølebehov kan det oppnås betydelige energibesparelser gjennom utnyttelse av termisk lagdeling. Dette gjelder spesielt i rom med stor takhøyde, som er tilfellet for klatrehallen.

Det er vurdert å være avgjørende å fjerne små støvpartikler fra rommets oppholdssone med tanke på å sikre et trygt og behagelig inneklima for klatrerne. Ventilasjonsanlegg basert på omrøring oppnår en lavere maksimal forurensningsfjerningseffektivitet enn systemer basert på fortrenning, det vil si at man ved fortrenningsventilasjon oppnår bedre luftkvalitet i oppholdssonen.

For å håndtere de nevnte utfordringene med tanke på helse, inneluftkvalitet og termisk komfort i klatrehallen i Elgesetergate 10 konkluderes det med at et anlegg basert på fortrenningsventilasjon vil være den foretrukne løsningen. Systemet bør utføres med tilluftstilførsel ovenfra, for å muliggjøre bruk av ventilasjonsluft til oppvarming av romluft i perioder med varmebehov. Behovsstyring av luftmengden må inkluderes i anleggets reguleringsstrategi. Anbefalingen er basert på teoretisk grunnlag og analyse av resultatene det er kommet frem til i arbeidet med denne oppgaven.

Enhver mulig løsning vil ha både fordeler og ulemper. For klatrehallen i Elgesetergate 10 er det vurdert å være avgjørende at ventilasjonsanlegget er i stand til å fjerne helseskadelige partikler fra oppholdssonen, samt opprettholde en lav romlufttemperatur. De nevnte faktorene er vektlagt i evalueringen av mulige løsninger. En slik løsning fører likevel med seg utfordringer, både relatert til potensielt økt energibehov til oppvarming på grunn av termisk lagdeling og til trekk i oppholdssonen. Det konkluderes med at fordelene ved fortrenningsventilasjon oppveier ulempene, og i det store bildet vil være den løsningen som er best egnet til å sikre et sunt og behagelig inneklima for klatrende studenter.

Kapittel 9

Videre arbeid

I løpet av arbeidet med denne oppgaven er det gjort målinger av svevestøvkonsentrasjon i to ulike klatreanlegg. For å få et mer komplett bilde av hvilke nivå av svevestøv som kan forventes i de fleste slike anlegg må det gjøres flere forsøk i et representativt utvalg av eksisterende klatrehaller. Grundigere undersøkelser av svevestøvetts sammensetning, det vil si hvordan partiklene fordeler seg i ulike størrelsesfraksjoner, bør gjennomføres. Eksisterende klatrehaller utført med ulike ventilasjonsprinsipper bør undersøkes, slik at en eventuell sammenheng mellom svevestøvkonsentrasjon og ventilasjonsprinsipp med større sikkerhet kan fastslås. Det er gjennom dette arbeidet funnet at litteratur omhandlende svevestøvproblematikk i klatrehaller, og i idrettsanlegg generelt, er mangelfull. Å sikre muligheten for fysisk aktivitet i et godt inn klima fritt for helseskadelig luftforurensning kan betraktes som et viktig folkehelseiltak, og dette vurderes således å være viktig å undersøke videre.

Et ventilasjonsanlegg basert på fortregning med tilluftstilførsel ovenfra ble vurdert å være best egnet til å håndtere utfordringene relatert til termisk komfort og inneluftkvalitet i klatrehallen i Elgesetergate 10. Dette er et relativt nytt konsept, og er ikke etablert som et naturlig alternativ til de mer velkjente og utprøvde prinsippene. Muligheten for å benytte fortrenningsventilasjon til oppvarming av romluft er spennende, og det bør gjennomføres forsøk og undersøkelser for å utvide eksisterende kunnskap om konseptet. Spesielt er det viktig at risiko for trekk i perioder med kjølebehov kartlegges.

Energiberegninger av klatrehallen i Elgesetergate 10 viste at det i de varmeste månedene forventes stort kjølebehov. Med en konvensjonell løsning basert på omrøringsventilasjon vil det måtte forsynes tilluft ved lav temperatur, og man kan risikere kondens på kanalene. Beregninger av hvor lav tilluftstemperatur som er nødvendig, samt ved hvilken temperatur risiko for kondens finnes, bør gjøres.

Muligheten for et kombinert anlegg, med både omrøringsventilasjon og fortrenningsventilasjon, ble diskutert som et interessant alternativ. Konseptet består av fortrenningsventiler som forsyner rommet med frisk luft det meste av dagen, og ventiler for omrøringsventilasjon som dekker varmebehovet om morgenen og i måneder med høyt varmebehov. Dette åpner for enda større grad av behovsstyring enn det som er mulig med et anlegg basert på kun det ene prinsippet, som igjen muliggjør enda større besparelser i energibruk til ventilering, oppvarming og kjøling.

Bibliografi

- Arge, K. (2003). Generalitet, fleksibilitet og elastisitet i kontorbygninger. *Norges byggforskningsinstitutt*.
- Balchen, J. G., Andresen, T., and Foss, B. A. (2003). *Reguleringsteknikk*. Institutt for teknisk kybernetikk, NTNU.
- Barne- og likestillingsdepartementet (2009). Norge universelt utformet 2025. <https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/bld/planer/2009/norge-universelt-utformet-2025-web-endelig.pdf>.
- Bøeng, A. C. and Holstad, M. (2013). Fakta om energi – utviklingen i energibruk i norge. *Statistisk Sentralbyrå*.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Whitsel, L., and Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease - an update to the scientific statement from the american heart association. *Circulation*, 121:2331–2378.
- bygg, F. (2018). Rapport powerhouse brattørkaia. <https://www.arkitektur.no/powerhouse-brattorkaia?tid=158202>.
- Calay, R., Borresen, B., and Holdø, A. (2000). Selective ventilation in large enclosures. *Energy and Buildings*, 32(3):281 – 289.
- Carlisle, A. J. and Sharp, N. C. C. (2001). Exercise and outdoor ambient air pollution. *British Journal of Sports Medicine*, 35(4):214–222.
- Chauvin Arnoux (2018). C.a 1510 technical datasheet. https://catalog.chauvin-arnoux.com/fr_en/c-a-1510.html.
- Chen, H., Moshfegh, B., and Cehlin, M. (2013). Investigation on the flow and thermal behavior of impinging jet ventilation systems in an office with different heat loads. *Building and Environment*, 59:127 – 144.
- Dahl Schlanbusch, R. and Lund Segtnan, I. (2017). 473.020 nullutslippsbygninger (zeb). retningslinjer og beregningsmetoder. *SINTEF Byggforsk*.
- Direktoratet for byggkvalitet (2017a). Byggteknisk forskrift (tek17) endringshistorikk. <https://dibk.no/byggereglene/endringshistorikk-tek17/>.

- Direktoratet for byggkvalitet (2017b). Byggteknisk forskrift (tek17) kapittel 12-7.
<https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/12/ii/12-7/>.
- Direktoratet for byggkvalitet (2017c). Byggteknisk forskrift (tek17) kapittel 13.
<https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/13/i/13-1/>.
- Fanger, P. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press.
- Grønn Byggallianse (2012). Breeam-nor nye tiltak / new construction – teknisk manual.
- Grønn Byggallianse (2017). Breeam-nor for nybygg 2016 - teknisk manual (sd5075nor - ver: 1.1).
- Grønn Byggallianse (2018). Hva er breeam-nor?
<http://ngbc.no/breeam-nor/>.
- Halvarsson, J. (2012). Occupancy pattern in office buildings: Consequences for hvac system design and operation. *Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology*.
- Hamedani, A. Z. and Huber, F. (2012). A comparative study of dgnb, leed and breeam certificate systems in urban sustainability. *The Sustainable City VII: Urban Regeneration and Sustainability*, 1121.
- He, G., Yang, X., and Srebric, J. (2005). Removal of contaminants released from room surfaces by displacement and mixing ventilation: modeling and validation. *Indoor Air*, 15(5):367–380.
- Heiselberg, P. (1994). Draught risk from cold vertical surfaces. *Building and Environment*, 29(3):297 – 301.
- Höppe, P. and Martinac, I. (1998). Indoor climate and air quality. *International Journal of Biometeorology*, 42(1):1–7.
- Ingebrigtsen, S. (2018a). *Ventilasjonsteknikk Del 1*. Skarland Press AS.
- Ingebrigtsen, S. (2018b). *Ventilasjonsteknikk Del 2*. Skarland Press AS.
- Karimipannah, T. and Awbi, H. (2002). Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation. *Building and Environment*, 37(12):1329 – 1342.
- Karimipannah, T., Sandberg, M., and Awbi, H. B. (2000). A comparative study of different air distribution systems in a classroom. 2:1013–1018.
- Kulturdepartementet og Norges klatreforbund (2015). Klatreanlegg - planlegging, bygging og drift. *Regjeringen.no*.
- Kvande, T. and Lisø, K. (2012). 451.021 klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring. *SINTEF Byggforsk*.
- Lassen, N. (2018). Powerhouse kjørbo – konsekvenser for innemiljøet. *SKANSKA Teknikk*.

- Liu, P., Mathisen, H. M., and Alonso, M. J. (2017). Theoretical prediction of longitudinal heat conduction effects on the efficiency of the heat wheel used for ventilation in powerhouse building “kjørbo” in norway. *Energy Procedia*, 105:4949 – 4954.
- Lovdata (2005). Lov om forbud mot diskriminering på grunn av nedsatt funksjonsevne (diskrimineringsloven).
<https://lovdata.no/dokument/LTI/lov/2008-06-20-42/%C2%A79#%C2%A79>.
- Maripuu, M.-L. (2009). Demand controlled ventilation (dcv) systems in commercial buildings: Functional requirements on systems and components. *Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology*.
- Mathisen, H. M. (2018). Forelesning: Demand controlled ventilation – behovsstyrt ventilasjon. lagret på blackboard under emne tep4245 vår 2018.
- Mundt, E., Mathisen, H. M., Nielsen, P. V., and Moser, A. (2004). *REHVA Guidebook No. 2 - Ventilation Effectiveness*. REHVA.
- Myhrvold, A., Olsen, E., and Lauridsen, O. (1996). Indoor environment in schools—pupils health and performance in regard to co2 concentrations. *Indoor Air*, 96(4):369–371.
- Mysen, M. and Schild, P. G. (2014). Behovsstyrt ventilasjon, dcv - forutsetninger og utforming. veileder for et energioptimalt og velfungerende anlegg. *SINTEF akademisk forlag*.
- Mysen, M., Schild, P. G., and Cablé, A. (2014). Demand-controlled ventilation — requirements and commissioning - guidebook on well-functioning and energy-optimal dcv. *SINTEF Academic Press*.
- Nasjonalt folkehelseinstitutt (2015). Anbefalte faglige normer for inneklima - revisjon av kunnskapsgrunnlag og normer. Forfattere: Toril Attramadal, Per Schwarze og Rune Becher.
- National Center for Biotechnology Information (2019). Pubchem database. magnesium carbonate, cid=11029.
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/11029>.
- Niachou, K., Hassid, S., Santamouris, M., and Livada, I. (2008). Experimental performance investigation of natural, mechanical and hybrid ventilation in urban environment. *Building and Environment*, 43(8):1373 – 1382. Hybrid Ventilation In The Urban Environment.
- Nilsson, P.-E., Abel, E., Clark, R., Ekberg, L. E., Fahlén, P., Fanger, P. O., Fitzner, K., Gunnarson, L., Jagemar, L., Nielsen, P. V., Stoops, J. L., Trüschel, A., and Wargocki, P. (2003). *Achieving the Desired Indoor Climate - Energy Efficiency Aspects of System Design*. The Commtech Group.
- Novakovic, V. (2017). Forelesning: Humid air. lagret på blackboard under emnet tep4315 høsten 2017.
- Novakovic, V., Hanssen, S. O., Thue, J. V., Wangensteen, I., and Gjerstad, F. O. (2007). *Enøk i bygninger - Effektiv energibruk*. Gyldendal Norsk Forlag AS.

- NTNU (2018). Campusutvikling.
<https://www.ntnu.no/campusutvikling/bakgrunn>.
- Pegasor (2019). White paper pegasor aq indoor™.
https://pegasor.fi/site/attachments/AQ_Indoor_white_paper_4.pdf.
- Pope, C. A. and Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6):709–742.
- Pope, C. A., RT, B., MJ, T., and et al (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287(9):1132–1141.
- Powerhouse (2018). Hva er et powerhouse?
<https://www.powerhouse.no/hva-er-et-powerhouse/>.
- Regjeringen (2018). Publikasjoner om idrettsanlegg.
<https://www.regjeringen.no/no/tema/kultur-idrett-og-frivillighet/innsiktsartikler/idrett/publikasjoner-om-idrettsanlegg/id86915/>.
- Säid, M., MacDonald, R., and Durrant, G. (1996). Measurement of thermal stratification in large single-cell buildings. *Energy and Buildings*, 24(2):105 – 115.
- Sandberg, M. (1981). What is ventilation efficiency? *Building and Environment*, 16:123–135.
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., and Fisk, W. J. (2012a). Is CO₂ an indoor pollutant? direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12):1671–1677.
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., and Fisk, W. J. (2012b). Is CO₂ an indoor pollutant? direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12):1671–1677.
- Senter for idrettsanlegg og teknologi (SIAT) (2017). Passivhusstandard for idrettshall.
https://www.godeidrettsanlegg.no/system/files/sites/default/files/Annleggstype/Idrettshaller/0m_idrettshaller/Passivhusstandard-for-idrettshall.pdf.
- Skåret, E. . (2000). *Ventilasjonsteknisk håndbok*. Norges byggforskningsinstitutt.
- Skistad, H., Mundt, E., Nielsen, P. V., Hagström, K., and Railio, J. (2002). *REHVA Guidebook No. 1 - Displacement Ventilation in Non-Industrial Premises*. REHVA.
- Smits, F., Killingland, M., nke, A. F. L., Andresen, I., Elvebakk, K., Holthe, F., Ragnøy, M. M., and Holmesland, M. (2013). Energiregler 2015 - forslag til endringer i tek for nybygg. *Utredning på oppdrag fra Direktoratet for byggkvalitet. Rambøll*.
- Sørensen, H. H. (1996). *Ventilation Ståbi*. Teknisk forlag.
- Standard Norge (2006). Ns-en iso 7730 *Ergonomi i termisk miljø - Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort*.

- Standard Norge (2012a). Ns 3701:2012 *Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Yrkesbygninger*.
- Standard Norge (2012b). Ns 8175 *Lydforhold i bygninger - Lydklasser for ulike bygningstyper*.
- Standard Norge (2016). Ns 3031 *Bygningers energiytelse - Beregning av energibehov og energiforsyning*.
- Taylor, P., Fuller, R., and Luther, M. (2008). Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. *Energy and Buildings*, 40(5):793 – 800.
- The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2013). Ashrae standard 62.1.
- The Research Centre on Zero Emission Buildings (2018). Zeb definitions.
<http://zeb.no/index.php/en/about-zeb/zeb-definitions>.
- Valavanidis, A., Fiotakis, K., and Vlachogianni, T. (2008). Airborne particulate matter and human health: Toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 26(4):339–362.
- van Hooff, T., Blocken, B., Defraeye, T., Carmeliet, J., and van Heijst, G. (2012). Piv measurements and analysis of transitional flow in a reduced-scale model: Ventilation by a free plane jet with coanda effect. *Building and Environment*, 56:301 – 313.
- Weinbruch, S., Dirsch, T., Ebert, M., Hofmann, H., and Kandler, K. (2008). Dust exposure in indoor climbing halls. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(5):648–654.
- World Health Organization (2018). Who air quality guideline values.
[https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- World Health Organization (WHO) (2010). Who guidelines for indoor air quality: selected pollutants.
- Yang, X. (1999). Study of building material emissions and indoor air quality. *Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology*.
- Yuan, X., Chen, Q., and Glicksman, L. R. (1998). A critical review of displacement ventilation. *ASHRAE Transactions*, 104:78. Copyright - Copyright American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc. 1998; Last updated - 2014-05-18; CODEN - ASHTAG.

Vedlegg A

Forberedelser til luftmålinger

A.1 Beregning av korreksjonsfaktor for *Maxim iButtons*

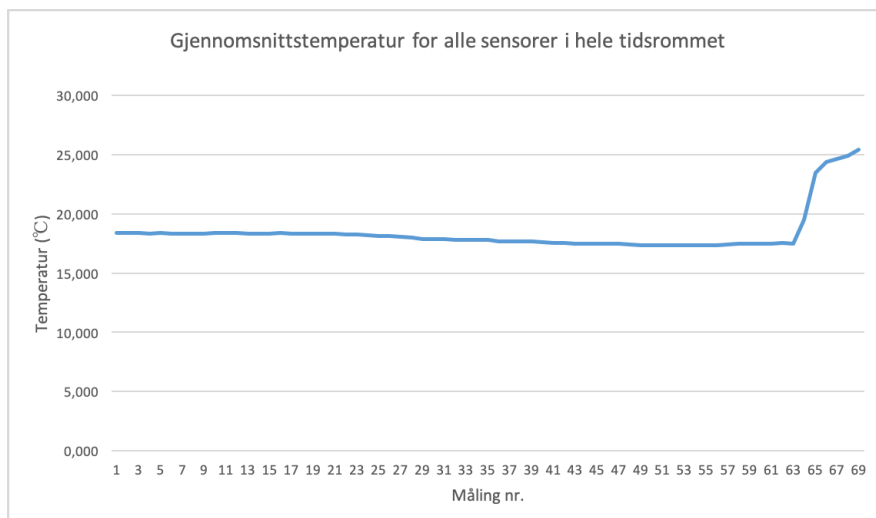
Maxim Integrateds *iButtons* er temperatursensorer som logger temperatur i et gitt tidsintervall, og med en gitt frekvens. I forkant av feltmålingene utført i forbindelse med denne oppgaven ble det utført en test for å undersøke hvorvidt sensorene har samme kalibrering, det vil si at alle sensorene måler samme temperatur når de plasseres i tilnærmet uniforme omgivelser.

Alle de 35 sensorene som skal brukes ble stilt inn til å logge temperaturdata fra omtrent klokken 18:00 den 5. februar 2019. Optimalt sett burde alle sensorene startet målingene samtidig, men det er ikke mulig å angi et bestemt klokkeslett for start av målinger; kun antall minutter fra innstilling til målingene settes i gang. Derfor blir det små ulikheter i starttidspunkt. Frekvensen for målingene ble satt til én måling per 900 sekunder (hvert 15. minutt). Sensorene ble plassert i en pappeske i et lukket lagerrom, for å unngå trekk og for å sikre at samtlige sensorer hadde samme omgivelsesforhold. Sensorene målte temperatur gjennom natten mellom den 5. februar og den 6. februar.

Temperaturdata fra sensorene ble registrert og analysert. Figur A.1 viser den gjennomsnittlige målte temperaturen for alle de 35 sensorene, over hele tidsrommet. Årsaken til den brå temperaturøkningen mot slutten av målingene er at sensorene på dette tidspunktet ble fjernet fra pappesken og flyttet til et rom beregnet for opphold, hvor lufttemperaturen er høyere enn i lagerrommet brukt til testen.

Av figur A.1 observeres det at gjennomsnittlig målt temperatur for alle sensorene er relativt konstant i løpet av de første 18 målingene. Resultatene for disse målingene er derfor brukt til å se nærmere på resultatene fra de ulike sensorene. Figur A.2 viser målt temperatur fra alle sensorene for de første 18 utførte målingene.

Gjennomsnittet for alle sensorene ligger på 18,37 °C gjennom de første 5 målingene, og synker jevnt til 18,34 °C mellom måling nummer 5 og måling nummer 18. Endringen er liten nok til at temperaturen kan ansees å være tilnærmet konstant. Gjennomsnittstemperaturen for de første 18 målingene og for alle sensorene er 18,3590 °C. Denne temperaturen betraktes som en korrekt måling, og målingene fra alle sensorene korrigeres mot denne. Korreksjonen gjøres ved at hver sensor får en korreksjonsfaktor,



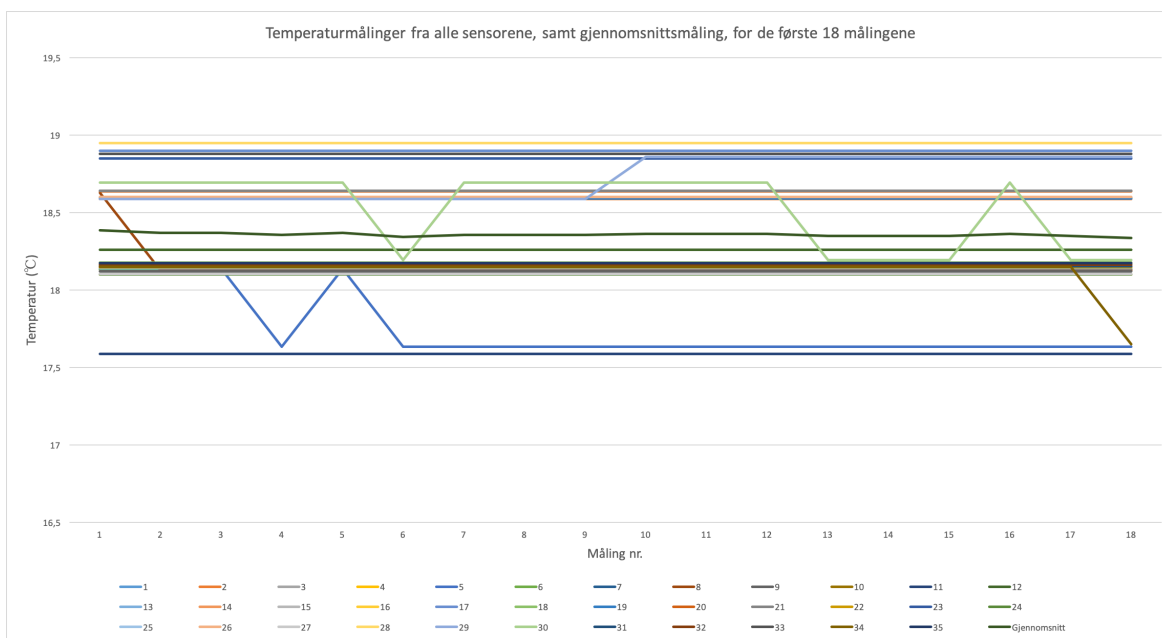
Figur A.1: Målt temperatur i pappesken som gjennomsnitt av målinger utført av alle de 35 *iButton*-sensorene.

som settes til differansen mellom 18,3590 °C og den enkelte sensors gjennomsnittsmåling for de første 18 målingene. Ved behandling av måledata fra det faktiske forsøket i Trondheim Klatresenter legges korreksjonsfaktoren til alle registrerte temperaturmålinger. I tabellene A.1, A.2 og A.3 i presenteres alle måledata fra de relevante målingene, samt den beregnede korreksjonsfaktoren for hver sensor.

Temperaturen i pappesken lå i området 17,0 – 18,5 °C gjennom hele testen. Det sees bort fra temperaturøkningen mot slutten av kurven i figur A.1, ettersom disse målingene ikke er en del av testen, og ikke er blitt brukt i utregningen av korreksjonsfaktor. Denne metoden kan således anees å gi korreksjonsfaktorer som er gyldige for temperaturområdet 17,0 – 18,5 °C. Avvik mellom faktisk temperatur og målt temperatur for hver sensor kan variere med temperaturnivå, og ideelt sett burde derfor temperatursensorene gjennomgått samme kalibreringsprosedyre for flere temperaturområder. Dette vil være upraktisk å gjennomføre, da spesielt for lave temperaturer ned mot 0 °C, hvor forsøket vil måtte gjennomføres utendørs. Det regnes som sannsynlig at temperaturer målt inne i klatrehallen vil være i nærheten av temperaturområdet brukt til utregning av korreksjonsfaktorer. Dermed vil det ikke føre med seg målefeil for innetemperaturmålinger at kalibreringen kun er utført for dette temperaturområdet.

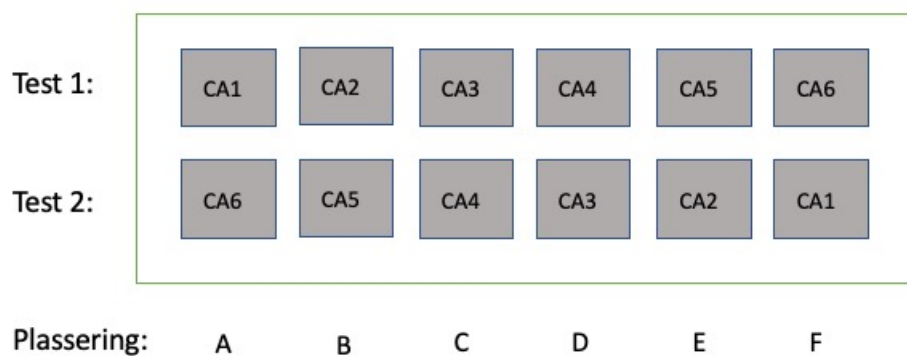
A.2 Testing av *Chauvin Arnoux 1510 ambient air tester*

Måleinstrumentet *C.A 1510* fra Chauvin Arnoux registrerer lufttemperatur, CO₂-konsentrasjon og relativ luftfuktighet. I dette arbeidet er det blitt brukt seks *C.A 1510*-målere. For å kunne vurdere eventuelle avvik i målte verdier mellom instrumentene er det utført en test av målerene. De seks målerene ble lagt side om side på et bord, uten eksponering for betydelig trekk eller stråling. Målerene ble innstilt til å registrere alle de tre parameterne (lufttemperatur, CO₂-konsentrasjon og relativ luftfuktighet) én gang per minutt i 15 minutter. Rekkefølgen på målerene ble byttet om og forsøket gjentatt, for å kunne avgjøre om ulikheter i målingene skyldes måleinstrumentet eller omgivelsene. Figur A.3 viser plasseringen av apparatene ved



Figur A.2: Målt temperatur fra alle *iButton*-sensorene, samt gjennomsnittet av disse, for de første 18 målingene av testen.

de to testmålingene.



Figur A.3: Plassering av de seks *CA 1510*-apparatene ved de to testmålingene.

I tabell A.4 presenteres endringen fra gjennomsnittlig måling i test 1 til gjennomsnittlig måling i test 2, både totalt og for hver plassering, og for alle de tre indikatorene. Trekkes den totale gjennomsnittlige endringen fra den gjennomsnittlige endringen for hver plassering, vil resultatet kunne gi en indikasjon

Tabell A.4: Gjennomsnittlig endring i de tre indikatorene for alle C.A 1510-målerne, og for hver plassering.

Indikator:	CO ₂	Temperatur	Relativ luftfuktighet
Gjennomsnittlig endring fra test 1 til test 2:	29,9	0,51	- 1,69
Gjennomsnittlig endring etter plassering:			
A	66,1	0,1	-1,3
B	24,5	0,3	-1,4
C	72,4	0,3	-1,5
D	-0,6	0,6	-1,8
E	45,3	0,8	-2,0
F	-28,3	0,9	-2,1

Tabell A.5: Differanse mellom total endring og endring etter plassering i testen av C.A 1510-målerne.

Plassering	Indikator		
	CO ₂	Temperatur	RF
A	36,2	-0,4	0,4
B	-5,4	-0,2	0,3
C	42,5	-0,2	0,2
D	-30,5	0,1	-0,1
E	15,4	0,3	-0,3
F	-58,2	0,4	-0,4

på usikkerheten i måleapparatet. Denne differansen presenteres i tabell A.5.

Produsenten oppgir måleområder og nøyaktighet for de ulike måleparameterne som presentert i tabell A.6 (Chauvin Arnoux (2018)). For temperatur og relativ luftfuktighet er feilmargine oppgitt fra produsenten større enn usikkerheten registrert i denne testen, og disse ansees derfor som gjeldende. Når det kommer til CO₂ er feilmarginen fra produsenten oppgitt i prosent fremfor absolutte verdier, og det er derfor ikke åpenbart hvorvidt usikkerheten registrert i dette forsøket er større eller mindre enn den oppgitte usikkerheten. Det er vurdert at produsentens oppgitte usikkerhet på 3 % vil gi den beste indikasjonen på måleusikkerheten i apparatet.

I evalueringen av alle målinger utført ved hjelp av apparatet C.A 1510 ambient air tester i forbindelse med denne oppgaven må det regnes med nøyaktighet tilsvarende det som er oppgitt fra produsenten (Chauvin Arnoux). Nøyaktigheten er gitt i tabell A.6.

I tabellene i figur A.4, figur A.5 og figur A.6 er alle måledata fra testen samlet, for henholdsvis CO₂, temperatur og relativ luftfuktighet.

Tabell A.6: Måleintervaller og nøyaktighet for C.A 1510 ambient air tester, som oppgitt fra produsenten.

Indikator	Måleintervall	Nøyaktighet
CO ₂	0 ppm – 5000 ppm	±3 %
Temperatur	- 10 °C – 60 °C	±0,5 °C
Relativ luftfuktighet	5 % RF – 95 % RF	±2 % RF

Figur A.6: Måledata fra testen av *CA 1510*-inneklimatestere, RF.

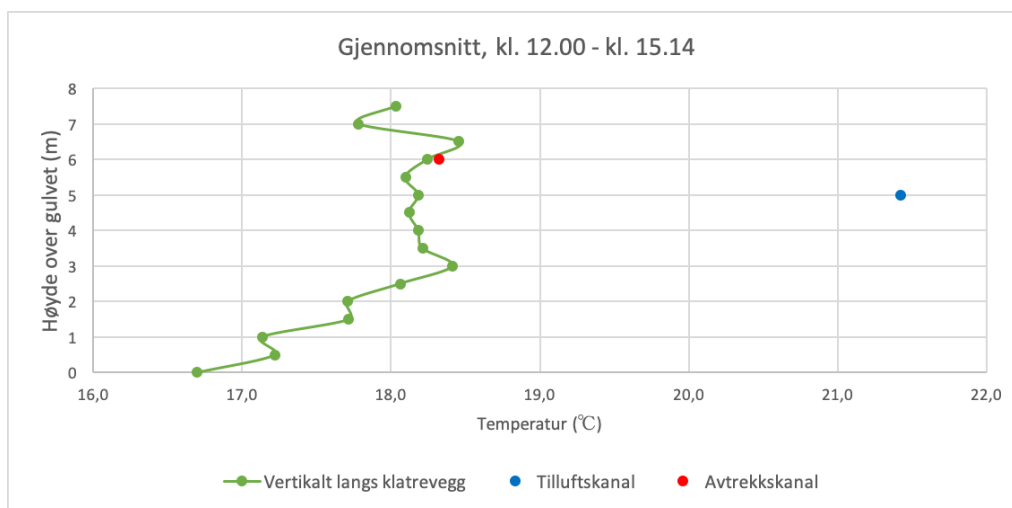
RH (%)																	
Plassering	Test 1																snitt
A	33,1	33	33	33	33	33,1	33	32,9	32,9	32,7	32,6	32,6	32,7	32,7	32,6	32,6	32,8
B	33,2	33,1	33	33,1	33,2	33,3	33,2	33	33,1	32,9	32,8	32,7	32,8	32,8	32,8	32,7	33
C	33,2	33,2	33	33,1	33,3	33,4	33,2	33,1	33,2	32,9	32,9	32,8	32,9	32,9	32,9	32,9	33,1
D	33,5	33,5	33,3	33,4	33,6	33,7	33,5	33,3	33,4	33,1	33,2	33	33	33,1	33	33	33,3
E	33,5	33,5	33,3	33,4	33,8	34	33,6	33,5	33,5	33	33,2	33	33,2	33,2	33,1	33,1	33,4
F	33,7	33,9	33,6	33,8	34,3	34,5	34	33,8	34	33,5	33,7	33,5	33,6	33,6	33,5	33,6	33,8
snitt	33,4	33,4	33,2	33,3	33,5	33,7	33,4	33,3	33,4	33	33,1	32,9	33	33,1	33	33	33,2
Plassering	Test 2																snitt
A	32,2	32	31,7	31,7	31,6	31,6	31,6	31,5	31,5	31,5	31,4	31,4	31,2	31,1	31,1	31	31,5
B	31,9	31,8	31,7	31,5	31,5	31,6	31,7	31,5	31,6	31,7	31,6	31,6	31,5	31,4	31,1	31,2	31,6
C	31,8	31,8	31,6	31,5	31,5	31,6	31,6	31,6	31,6	31,8	31,7	31,6	31,5	31,4	31,2	31,1	31,6
D	31,5	31,6	31,4	31,4	31,4	31,5	31,6	31,6	31,7	31,8	31,7	31,7	31,6	31,5	31,2	31,3	31,5
E	31,4	31,3	31,2	31,2	31,2	31,3	31,4	31,4	31,4	31,7	31,6	31,5	31,4	31,3	31,2	31,2	31,4
F	31,4	31,5	31,3	31,3	31,2	31,5	31,9	31,9	31,9	32,2	32,1	31,9	31,8	31,7	31,6	31,5	31,7
snitt	31,7	31,7	31,5	31,4	31,4	31,5	31,6	31,6	31,6	31,8	31,7	31,6	31,5	31,4	31,2	31,2	31,5

Vedlegg B

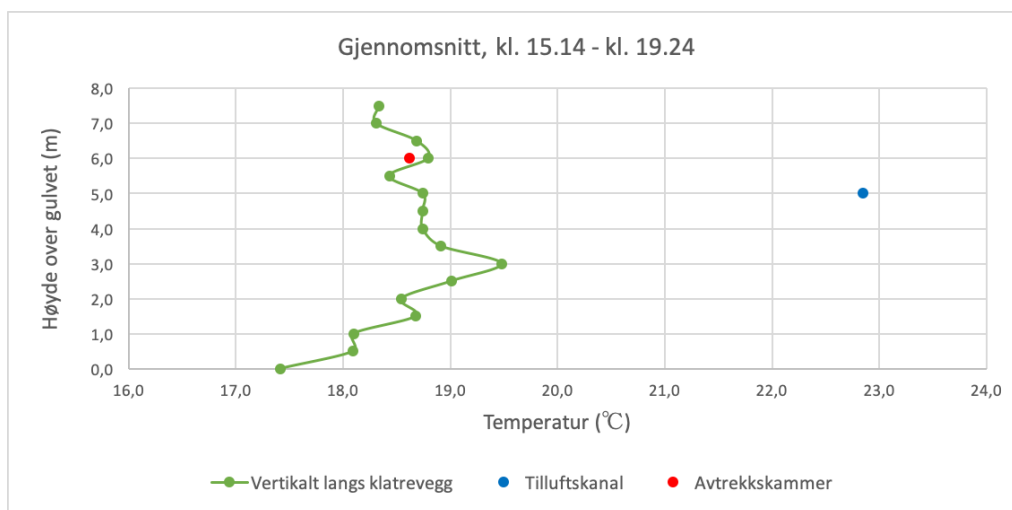
Tillegg til resultater av luftmålinger

Figurene B.1, B.2 og B.3 viser temperatursjiktning vertikalt langs en klatrevegg i Trondheim Klatresenter, for ulike tidspunkt gjennom dagen den 21. februar 2019.

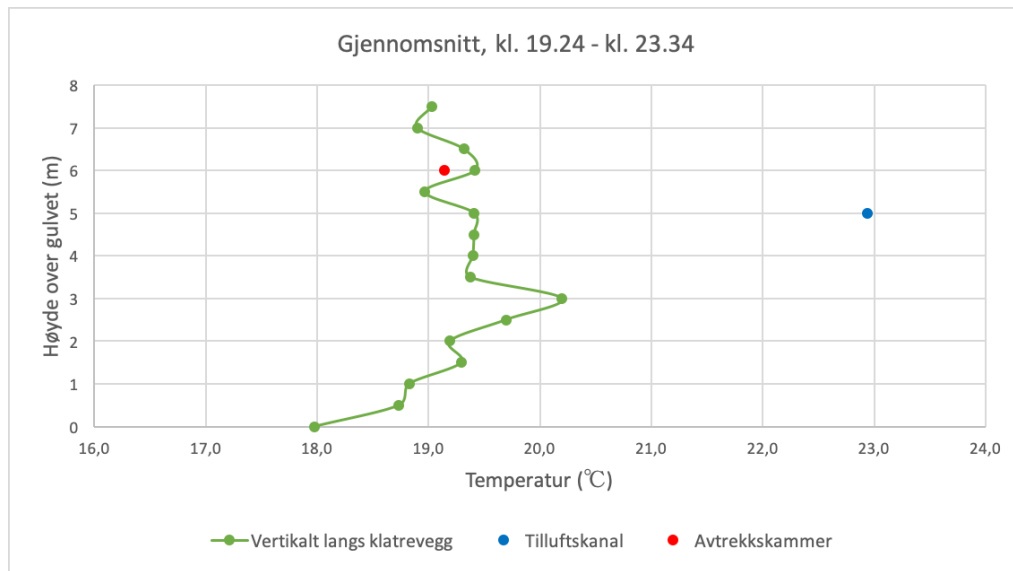
Figurene B.4, B.5, B.6 og B.7 viser utviklingen i målt svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter idet ventilasjonsanlegget startes opp om morgenen for henholdsvis 29. mars, 30. mars, 31. mars og 1. april 2019.



Figur B.1: Temperatursjiktning vertikalt langs en klatrevegg i Trondheim Klatresenter når det brukes et gjennomsnitt av alle temperaturmålingene gjort i tidsrommet mellom klokken 12:00 og klokken 15:14 den 21. februar.



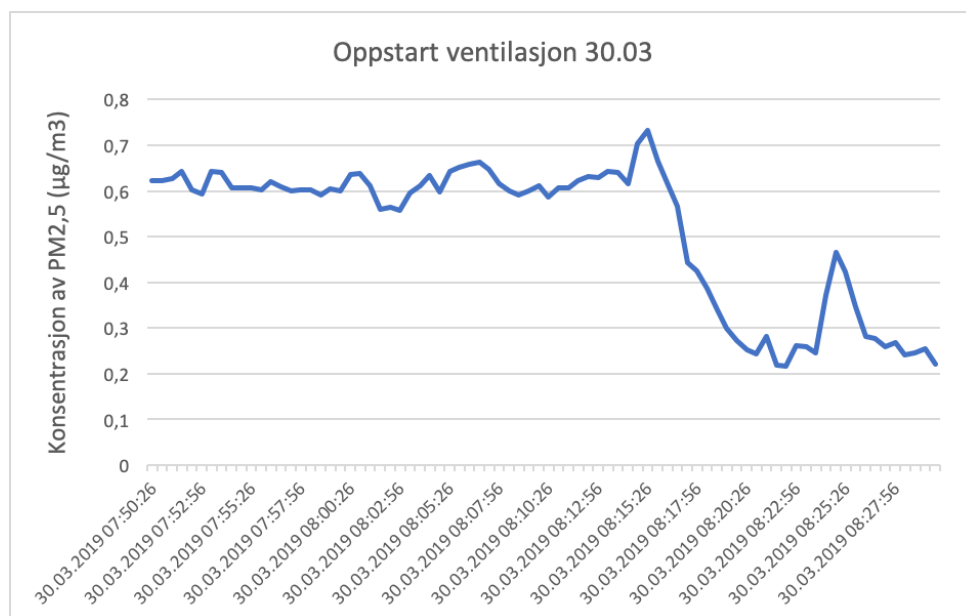
Figur B.2: Temperatursjiktning vertikalt langs en klatrevegg i Trondheim Klatresenter når det brukes et gjennomsnitt av alle temperaturmålingene gjort i tidsrommet mellom klokken 15:14 og klokken 19:24 den 21. februar.



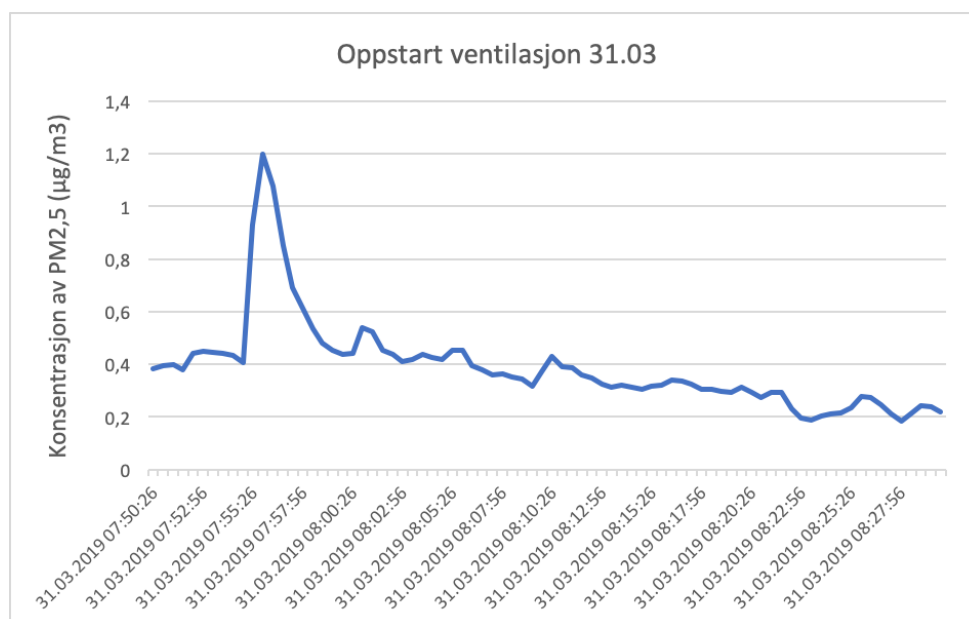
Figur B.3: Temperatursjiktning vertikalt langs en klatrevegg i Trondheim Klatresenter når det brukes et gjennomsnitt av alle temperaturmålingene gjort i tidsrommet mellom klokken 19:24 og klokken 23:34 den 21. februar.



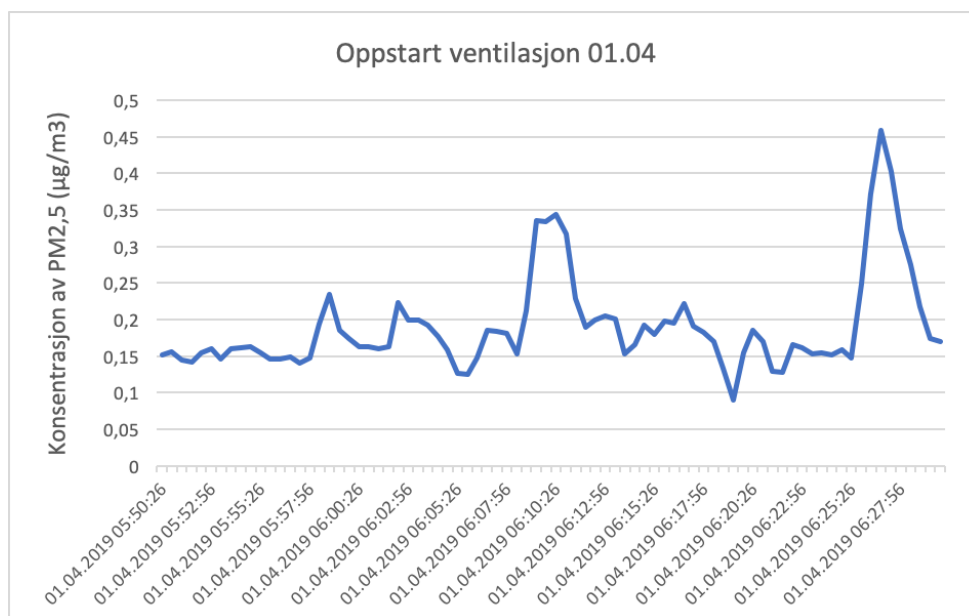
Figur B.4: Utvikling i svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter ved oppstart av ventilasjonsanlegget den 29.03.2019.



Figur B.5: Utvikling i svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter ved oppstart av ventilasjonsanlegget den 30.03.2019.



Figur B.6: Utvikling i svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter ved oppstart av ventilasjonsanlegget den 31.03.2019.



Figur B.7: Utvikling i svevestøvkonsentrasjon i klatrehallen på Dragvoll idrettsenter ved oppstart av ventilasjonsanlegget den 01.04.2019.

Vedlegg C

Spørreundersøkelse gjennomført i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter

Dette vedlegget inneholder spørreundersøkelsen gjennomført i klatrehallen på Dragvoll idrettssenter, slik den ble presentert for respondentene. Et informasjonsskriv ble hengt opp i lokalet i forbindelse med undersøkelsen. Begge dokumentene er vedlagt på de to påfølgende sidene.

Spørreundersøkelse til personer som oppholder seg i klatreveggen på Dragvoll Idrettssenter.
Start: 28.03.19, slutt: 01.04.19.

Tusen takk for hjelpen!

Når ble undersøkelsen besvart?

Dato

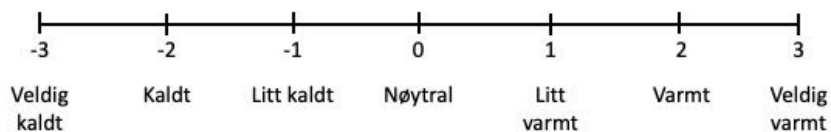
<input type="checkbox"/> Tors. 28.03	<input type="checkbox"/> Fre. 29.03	<input type="checkbox"/> Lør. 30.03	<input type="checkbox"/> Søn. 31.03	<input type="checkbox"/> Man. 01.04
--------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------

Klokkeslett

<input type="checkbox"/> 08.00-12.00	<input type="checkbox"/> 12.00-16.00	<input type="checkbox"/> 16.00-20.00	<input type="checkbox"/> 20.00-24.00	<input type="checkbox"/> 00.00-08.00
--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------

Spørsmål 1:

Hvordan oppleves temperaturen i lokalet når du er i aktivitet? Kryss av på skalaen under.



Spørsmål 2:

Opplever du at det er mye støv i luften i lokalet? Sett kryss.

Ja Nei

Spørsmål 3:

Hvis du svarte ja på spørsmål 2: Hvor mye plages du av støv når du oppholder deg i lokalet?
(F.eks. tørre øyne, tørr i halsen, etc.)

Plages ikke Plages noe Plages mye

Noe annet du ønsker å legge til vedrørende temperatur eller luftkvalitet i lokalet?

Hei!

I forbindelse med min masteroppgave gjennomfører jeg en **kort** spørreundersøkelse vedrørende luftkvalitet og termisk komfort i dette lokalet.

Har du tid til å sette av ca. 30 sekunder til å besvare undersøkelsen? Alle svar er til stor hjelp! :)

Svarark legges i esken.

Det er også plassert ut diverse måleapparater i lokalet, hvor temperatur og luftkvalitet (svevestøv, CO₂, etc.) blir kartlagt. Jeg setter stor pris på at alle apparater får stå i fred.

Tusen takk for hjelpen!

Mvh,
Katrine Merkesdal Hall
Student (MSc), Institutt for Energi- og prosessteknikk, NTNU



Vedlegg D

Inndata til SIMIEN-modell

D.1 Prosjektdata

- Klimasted: Trondheim
- Bygningskategori: Idrettsbygg
- Energiforsyning: Elektrisitet
 - Sys.virkningsgrad romoppv.: 1

D.2 Sone: Klatrehall

- Oppv. gulvareal: $202,2$ (klatrevegg) + $63,5$ (buldre) = $265,7$ m²
- Oppv. luftvolum: $3,7$ m * $63,5$ m² (buldre) + $13,65$ m * $202,2$ m² (klatre) = 2995 m³
- Driftsdager: Alle dager i året (08-23) bortsett fra uke 52 (juleferie) og uke 26 – 32 (sommerferie). NS 3031, tabell A.8
- Driftstider: 15 timer/dag, 7 dager per uke

D.2.1 Fasader og skillekonstruksjoner

- Fasade mot vest
 - Totalt areal inkl. vinduer: 117 m²
 - Himmelfretning: Vest mot sørvest
 - Horisont: 9°
- Glassfasade mot vest

- Areal: $8,8 \text{ m} * 13,3 \text{ m} = 117 \text{ m}^2$
- U-verdi: $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Total solfaktor (glass+skjerming): 0,4
- Fasade mot nord
 - Totalt areal inkl. vinduer: $123,3 \text{ m}^2$
 - Himmelretning: Nord mot nordvest, 340
 - Horisont: 36
- Glassfasade mot nord
 - Areal: $8,8 \text{ m} * 14 \text{ m} = 123,3 \text{ m}^2$
 - U-verdi: $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 - Total solfaktor (glass+skjerming): 0,4
- Innvendig vegg mot sør
 - Areal: $4,4 * 3,4 + 13,8 * 13,1 = 195,7 \text{ m}^2$
 - Skillekonstruksjonen vender mot rom/sone med samme temperatur
 - Konstruksjon: Vindu
- Innvendig vegg mot øst fra buldreareal
 - Areal: $3,4 * 13,7 = 46,6 \text{ m}^2$
 - Skillekonstruksjonen vender mot rom/sone med samme temperatur
 - Konstruksjon: Vegg/dør
- Innvendig vegg mot øst fra klatrehall
 - Areal: $8,8 * 13,7 = 120,6 \text{ m}^2$
 - Skillekonstruksjonen vender mot rom/sone med samme temperatur
 - Konstruksjon: Vindu
- Himling
 - Areal: $265,7 \text{ m}^2$ (=gulvareal)
 - Skillekonstruksjonen vender mot rom/sone med samme temperatur
 - Konstruksjon: Himling
- Gulv
 - Totalt gulvareal: $380,3 \text{ m}^2$ (inkludert nederste del av ytterveggene mot nord og vest)

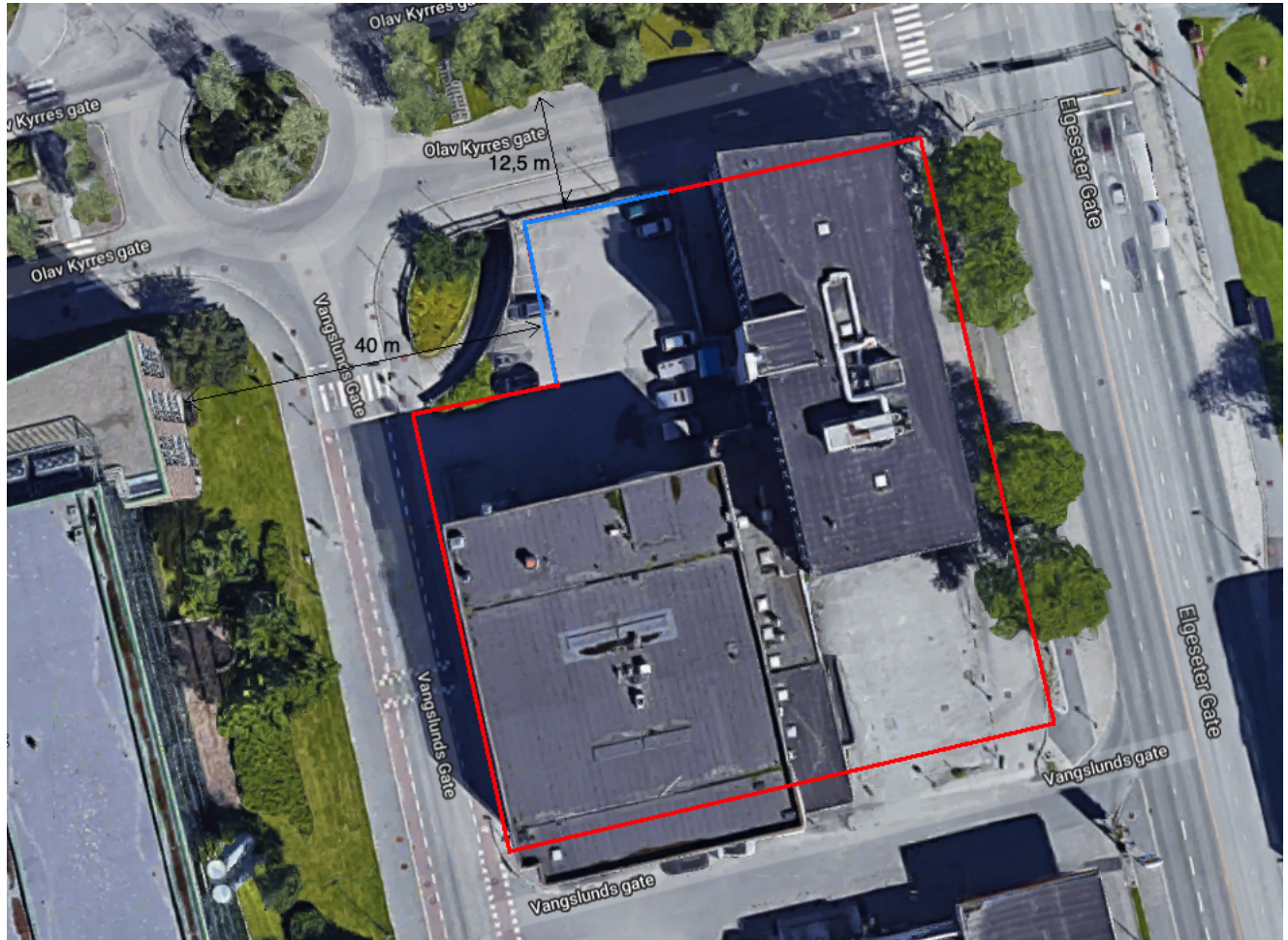
- Gulv på grunn

D.2.2 Ventilasjon (VAV)

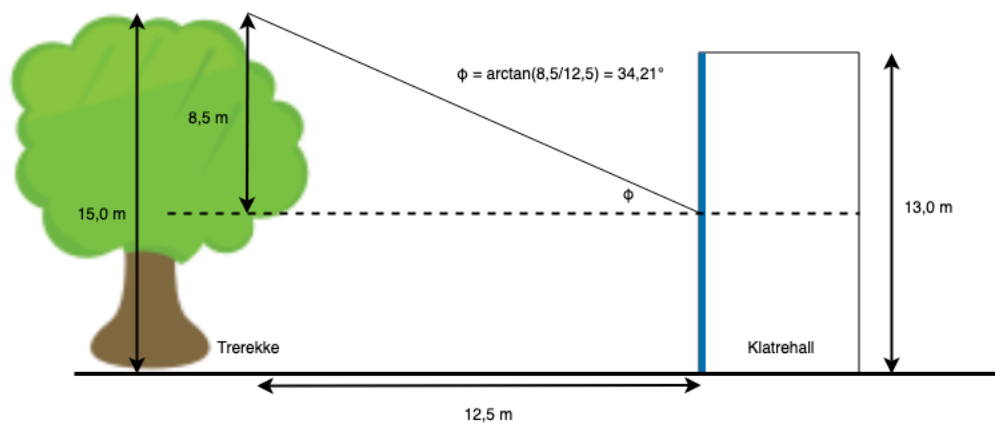
- Luftmengde reguleres for å holde romlufttemp. under 22 °C (krav i RFP)
- Luftmengder
 - Min. luftmengde i driftstid: $6,0 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{m}^2)$ (NS 3701)
 - Min. luftmengde utenom driftstid: $1,0 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{m}^2)$ (NS 3701)
- Tilluftstemperatur
 - Normal tilluftstemperatur: 19,0 °C
 - Annen tilluftstemperatur sommer: 17,0 °C
 - sommermåned: Mai – august
- Driftstid: 07.00 – 23.00
- Komponenter
 - Vannbårent varmebatteri, delta T: 20 K
 - Spesifikk pumpeeffekt varmebatteri: 0,5 kW/(l/s)
 - Vannbårent kjølebatteri, delta T: 7 K
 - Spesifikk pumpeeffekt kjølebatteri: 0,6 kW/(l/s)
 - SFP-faktor driftstid: 1,2 kW/m³/s
 - SFP-faktor utenom driftstid: 0,6 kW/m³/s
 - Varmegjenvinner, temp.virkningsgrad: 80 %
- Nattkjøling (kun aktivert for enkelte simuleringer)
 - Luftmengde ved nattkjøling: $12,0 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{m}^2)$
 - Nattkjøling aktiveres når minst to av følgende kriterier oppfylles:
 - * Gjennomsnittlig utetemp. i driftstid overstiger 20 °C
 - * Gjennomsnittlig romlufttemp. i driftstiden overstiger 22 °C
 - * Maks. romlufttemp. i driftstiden overstiger 24 °C
 - Nattkjølingen avbrytes hvis en av følgende kriterier inntreffer:
 - * Tilluftstemp. blir lavere enn 12 °C
 - * Romlufttemp. blir lavere enn 18 °C

D.2.3 Internlaster

- Belysning
 - Effektbehov i driftstiden: 2,7 W/m²
 - Varmetilskudd: 100 % av effektbehov
 - Driftsmønster: 08.00 – 23.00
- Teknisk utstyr
 - Effektbehov i driftstiden: 1 W/m²
 - Varmetilskudd: 100 % av effektbehov
 - Driftsmønster: 08.00 – 23.00
- Personer
 - Varmetilskudd personer: 10 W/m²
 - Driftsmønster: 08.00 – 23.00



Figur D.1: Avstand mellom klatrehallens fasade mot vest og bygningen på motsatt side av veien, og avstand mellom klatrehallens fasade mot nord og trerekken i midtrabatten på veien mot nord. Avstandene ble benyttet til å finne skjermingen fra bygningen og trærne. Figuren er laget med utgangspunkt i et skjermbilde fra Google Maps.



Figur D.2: Beregning av skjermingsvinkel for klatrehallens fasade mot nord.

Vedlegg E

Vedlegg relatert til luftmålinger utført av Buch og Jensås

Tabell E.1: Tidspunkt for målinger av konsentrasjon av partikler i ulike størrelsesfraksjoner ved de fire målepunktene brukt i målingene til Buch og Jensås.

	Målepunkt A	Målepunkt B	Målepunkt C
Måling	Tidspunkt	Tidspunkt	Tidspunkt
1	11:18	11:33	11:38
2	18:53	18:49	18:56

Figur E.1: Resultat av partikkelmålinger utført av Buch og Jensås i Trondheim Klatresenter den 21. februar, punkt A (foran klatrevegg).

Punkt A	PT/m ³	PT/m ³
µm	Verdi	Verdi
0,3	7316254	19625440
0,5	5328268	26210250
1	3745230	15582330
3	880919	3489400
5	735689	2985866
10	154064	708834
Tidspunkt	11:18	18:33

Figur E.2: Resultat av partikkelmålinger utført av Buch og Jensås i Trondheim Klatresenter den 21. februar, punkt B (midt i hallen).

Punkt B	PT/m3	PT/m3
μm	Verdi	Verdi
0,3	8852650	24895410
0,5	5875265	34223320
1	4989400	15938160
3	1196820	3178092
5	992226	2670318
10	202827	653004
Tidspunkt	11:33	18:49

Figur E.3: Resultat av partikkelmålinger utført av Buch og Jensås i Trondheim Klatresenter den 21. februar, punkt C (i styrkedelen).

Punkt C	PT/m3	PT/m3
μm	Verdi	Verdi
0,3	8219082	23217320
0,5	6944523	29011660
1	6553004	18615190
3	1656184	4146643
5	1512014	3612721
10	358304	828622
Tidspunkt	11:38	18:56

Vedlegg F

Risikoanalyse gjennomført i forkant av luftmålingene i Trondheim Klatresenter

Vedlagt på de følgende sidene er risikovurderingen gjennomført i forkant av luftmålingene i Trondheim Klatresenter.

Sannsynlighet vurderes etter følgende kriterier:

1 - Svært liten 1 gang pr. 50 år eller sjeldnere. Ergonomi/psykososialt: Ingen tilfeller.	2 - Liten 1 gang pr. 10 år eller sjeldnere. Ergonomi/psykososialt: Ette enkelt tilfelle.	3 - Middels 1 gang pr. år eller sjeldnere. Ergonomi/psykososialt: Enkelttilfeller	4 - Stor 1 gang pr. måned eller sjeldnere. Ergonomi/psykososialt: Periodevis	5 - Svært stor Daglig - hver uke. Ergonomi/psykososialt: Kontinuerlig
---	--	---	--	---

Konsekvens vurderes etter følgende kriterier:

Gradering	Menneske	Ytre miljø Vann, jord og luft	Øk/materiell	Omdømme
5 - Svært Alvorlig	Død eller uførhet/varig nedsatt funksjonsevne	Svært langvarig og ikke reversibel skade	Drifts- eller aktivtetsstans >1 år.	Troverdighet og respekt betydelig og varig svekket
4 - Alvorlig	Alvorlig skade/belastning som krever medisinsk behandling. Mulig uførhet/varig nedsatt funksjonsevne	Langvarig skade. Lang restitusjonstid	Driftsstans > ½ år Aktivtetsstans i opp til 1 år	Troverdighet og respekt betydelig svekket
3 - Moderat	Alvorlig skade/belastning som krever medisinsk behandling. Lang restitusjonstid.	Mindre skade og lang restitusjonstid	Drifts- eller aktivtetsstans < 1 mnd.	Troverdighet og respekt svekket
2 - Liten	Skade /belastning som krever medisinsk behandling. Reversibel skade. Kort restitusjonstid.	Mindre skade og kort restitusjonstid	Drifts- eller aktivtetsstans < 1uke	Negativ påvirkning på troverdighet og respekt
1 - Svært liten	Mindre skade/belastning som krever enkel behandling. Reversibel skade/belastning. Kort restitusjonstid.	Ubetydelig skade og kort restitusjonstid	Drifts- eller aktivtetsstans < 1dag	Liten påvirkning på troverdighet og respekt

Risikoverdi = Sannsynlighet x Konsekvens:

	SANNSYNLIGHET					
	1. Svært liten	2. Liten	3. Middels	4. Stor	5. Svært stor	
KONSEKVENNS	5. Svært alvorlig	5	10	15	20	25
	4. Alvorlig	4	8	12	16	20
	3. Moderat	3	6	9	12	15
	2. Liten	2	4	6	8	10
	1. Svært liten	1	2	3	4	5

Fargene angir grad av risiko:

Rød	Uakseptabel risiko. Tiltak skal gjennomføres.
Gul	Middels risiko. Tiltak skal vurderes.
Grønn	Akseptabel risiko. Tiltak kan vurderes.