

Naturleg ventilasjon og komfort i kontorbygg

Ragni Melstveit

Master i energibruk og energiplanlegging
Innlevert: juni 2016
Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
Institutt for energi- og prosessteknikk

EPT-M-2016-86

MASTEROPPGAVE

for

Student

Ragni Melstveit

Våren 2016

Naturlig ventilasjon og komfort i kontorbygg
Natural ventilation and thermal comfort in office buildings

Bakgrunn og målsetting

I prosjektet «Naturlig klimatisering av fremtidens energieffektive kontorbygg» (Natklim) er ideen å utvikle kunnskap, konsepter, teknologier og strategier for naturlig klimatisering av bygninger. Dette skal føre til betydelig reduksjon av energibruk, lavere kostnader, høy arkitektonisk kvalitet og godt innemiljø.

En viktig del av dette vil være bruk av naturlig ventilasjon. Bruk av naturlig ventilasjon (NV) medføre ulike problemstillinger som trekk ved lave utetemperaturer eller støy. For å få mer kunnskap om problemstillingen skal strømningsmønstre i naturlig ventilerte høyisolerte kontorbygg ved lave utetemperaturer (under typisk grense for NV på ca. 10 °C) undersøkes. Det er også nødvendig å kartlegge konsekvenser for lokal komfort i oppholdssonen og om det er nødvendig å definere en «komfortsone» der komfortkriteriene etter NS-EN ISO 7730 oppnås.

Målsetting:

Målet med oppgaven er å finne svar på følgende problemstillinger:

- 1) Kan det etableres en oppholdssone der lokal komfort sikres ved lave utetemperaturer?
- 2) Kan det oppnås komfort med andre planløsninger enn dagens? (f.eks. med adkomst/korridorer langs fasade)

Oppgaven er tilknyttet forskningsprosjektet Natklim ved SINTEF Byggforsk

Oppgaven kan bearbeides ut fra følgende punkter

1. Litteraturstudie knyttet til naturlig ventilasjon ved bruk av vinduer eller luker
2. Finne egnede bygninger for feltmålinger og planlegge målinger
3. Utføre målinger, helst under ulike forhold
4. Generalisere måleresultatene og sammenligne med teoretiske modeller
5. Bruke resultatene til vurderinger mot komfortkriterier og alternative oppholdssoner
6. Forslå løsninger for hvordan planløsningen bør være i bygninger med naturlig ventilasjon.

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sendte instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesssteknikk.

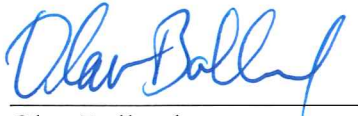
Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

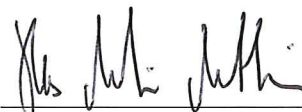
Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, institutt navn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningssteknisk, varmeteknisk)
 Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 13. januar 2015



Olav Bolland
Instituttleder



Hans Martin Mathisen
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder(e):
Michael Gruner

Forord

Denne masteroppgåva er levert ved Institutt for energi- og prosessteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU, i Trondheim, våren 2016. Oppgåva representerer slutten på det toårige masterstudiet Energibruk og energiplanlegging. Hovudveileiar har vore professor Hans Martin Mathisen ved NTNU. Forskar Michael Gruner, ved NTNU og SINTEF, har vore medveileiar.

I anledning med mitt avsluttande arbeid ved NTNU, er det ei rekkje personar eg vil takke.

Fyrst og fremst vil eg rette ein stor takk til min veileiar, Hans Martin Mathisen, for gode råd og tankar på vegen. I tillegg vil eg gjerne takke Eric Sandnes og Bjørn Ove Kvello i driftsavdelinga ved NINA-huset, Geir Nilsen ved NTNU Eiendomsforvaltning og Edvin Karlstrøm ved NTNU Drift.

Ein takk går også til mine medstudentar for både saklege og usaklege samtalar gjennom mi tid i Trondheim. Til slutt ein takk til min familie som har støtta meg gjennom heile studieløpet.

Ragni Melstveit
Trondheim, juni 2016

Samandrag

Bygningar står i dag for over 40 % av verdas energiforbruk, noko det er stort ynskje om å redusere. For å få det til, må ikkje berre dagens løysingar bli betre, men også nye alternativ vurderast. Som eit svar på dette vart forskingsprosjektet *Naturligvis* starta i 2015, med tanken om å utvikle nye strategiar for naturleg klimatisering av bygningar.

I denne rapporten vert det i den samanheng sett på naturleg ventilasjon i kontorlandskap. Målet er å undersøkje om det er mogeleg å bruke naturleg ventilasjon ved utetemperaturar lågare enn 10 °C, med omsyn til komfort i opphaldssona.

Det vart gjennomført målingar på lufthastigheit og temperatur, i eit kontorlandskap på 184 m² i eit eldre bygg. Forsøket vart gjort med sjokklufting gjennom eit topphengsla vindauge. Det vart gjort berekningar på tilførte luftmengder. For å vurdere CO₂-nivået vart det utført simuleringar i IDA ICE.

Resultat frå målingane viste høge hastigheitar og låge temperaturar i opphaldssona. Krava til komfort frå NS-EN ISO 7730 vart ikkje tilfredsstilt. Berekningar viste at det vart mange misnøgde i rommet både på grunn av trekk, og på grunn av stor temperaturforskjell mellom ankel og hovud. Frå simuleringane vart det funne at krava til CO₂-konsentrasjon i kontorlandskap kan oppfyllest med rett luftestrategi. Då kan det derimot oppstå problem med låge innetemperaturar.

Konklusjonen var at det ikkje kan anbefalast å bruke sjokklufting med store vindauge, ved utetemperaturar lågare enn 5 °C. Det vil ikkje vere mogeleg å på same tid tilfredsstille dagens krav til termisk komfort, CO₂-nivå og luftmengder.

Abstract

Today buildings account for over 40 % of the worlds energy consumption, there is a strong wish to reduce this. To accomplish this, todays solutions not only have to be improved, but new solutions must be evaluated. As an answer, the research project *Naturligvis*, or *Naturally* in English, was started based on the idea of developing new strategies for natural climatization of buildings.

In that context, this report considers natural ventilation in office environments. The objective is to evaluate the possibility to utilize natural ventilation when the outdoor temperature is lower than 10 °C, with respect to experienced comfort in the occupancy zone.

Measurements of air velocity and temperature were conducted in an older office at 184 m². The measurements were carried out with shock ventilation through an awning window. Calculations on airflow rates were conducted. To evaluate the CO₂-concentrations simulations in IDA ICE were performed.

Results from the measurements showed high air velocities and low air temperatures in the occupancy zone. The minimum requirements from NS-EN IOS 7730 were not found to be satisfied. Calculations showed that there were a large number of dissatisfied persons due to draught, and due to great temperature difference between the ankles and the head. From the simulations it was found that the requirements for CO₂-levels in offices can be fulfilled with the right airing strategy. In that case, problems with low indoor temperatures can occur.

The conclusion was that it can not be recommended to utilize shock ventilation with large windows when the outdoor temperature is lower than 5 °C. It is not possible to simultaneously fulfill todays requirements for thermal comfort, CO₂-concentrations and airflow rates.

Innhold

Forord	i
Samandrag	iii
Abstract	v
Figurliste.....	xi
Tabelliste	xiii
Forkortingar.....	xv
1. Innleiing	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling.....	1
1.3 Avgrensing.....	2
1.4 Disposisjon	2
2. Teori	3
2.1 Naturleg ventilasjon.....	3
2.1.1 Drivkrefter.....	3
2.1.2 Ventilasjonsprinsipp.....	5
2.1.3 Tidlegare forskning på vindaugslufting	6
2.1.4 Eksisterande bygg med naturleg ventilasjon	8
2.2 Inneklima	15
2.2.1 Termisk miljø	17
2.2.2 Atmosfærisk miljø.....	21
2.2.3 Tidlegare forskning på inneklima	23
2.3 Matematiske modellar	25
2.3.1 De Gids og Phaffs metode.....	25
2.3.2 Warrens metode.....	26
2.3.3 Larsen og Heiselbergs metode	27
3. Referansebygg.....	29
3.1 NINA-huset	29
3.1.1 Byggtekniske detaljar	30
3.1.2 Ventilasjon	32
3.2 Varmeteknisk laboratorium	33
3.2.1 Byggtekniske detaljar	34

4.	Metode for målinger.....	39
4.1	Førebuingar.....	39
4.1.1	Risikovurdering.....	39
4.2	Målefeil.....	40
4.3	Måleutstyr.....	41
4.3.1	Måling av lufthastigheit	41
4.3.2	Temperaturmålingar	43
4.3.3	CO ₂ -målingar	45
4.3.4	Personar til stades.....	46
4.4	Utføring	46
4.4.1	Hastigheit og temperatur	46
4.4.2	CO ₂ -måling.....	50
5.	Resultat frå målingar	53
5.1	Vêrdata.....	53
5.2	Sjokklufting	55
5.2.1	Hastigheit	55
5.2.2	Temperatur	62
5.2.3	Standardavvik.....	69
5.3	CO ₂ -målingar.....	69
5.3.1	Samanlikning av Varmeteknisk og NINA-huset.....	70
6.	Berekningar	71
6.1	Analyse av termisk komfort	71
6.1.1	Misnøgde grunna trekk.....	71
6.1.2	Misnøgde grunna temperatur.....	72
6.2	Nødvendig luftmengde	73
6.2.1	Samanlikning med matematiske modellar	73
7.	Simulering	77
7.1	Inndata	77
7.2	Tidsskjema for lufting	79
7.2.1	Simulering A: Lufting tre gonger.....	79
7.2.2	Simulering B: Annakvar time	79
7.2.3	Simulering C: Kvar time	80
8.	Resultat simuleringar.....	81

8.1	Simulering A.....	82
8.1.1	Temperatur	83
8.1.2	Luftkvalitet	84
8.1.3	PMV og PPD.....	85
8.1.4	Oppsummering av simulering A	86
8.2	Simulering B.....	87
8.2.1	Temperatur	88
8.2.2	Luftkvalitet	89
8.2.3	PMV og PPD.....	90
8.2.4	Oppsummering av simulering B	91
8.3	Simulering C.....	92
8.3.1	Temperatur	93
8.3.2	Luftkvalitet	94
8.3.3	PMV og PPD.....	95
8.3.4	Oppsummering av simulering C	96
9.	Diskusjon.....	97
10.	Konklusjon	105
11.	Vidare arbeid	107
	Referansar.....	

Figurliste

Figur 2.1: Trykkforskjell i høg bygning utan innvendige etasjeskilje.....	4
Figur 2.2: Trykkforskjell i høge bygningar med ope trapperom og heissjakt.....	5
Figur 2.3: Naturlege ventilasjonsprinsipp. Basert på Santamouris og Wouters (2006).....	6
Figur 2.4: Vestre Kanalvei 20 i Trondheim. Brukt med samtykke. Foto: ARC Arkitekter (2015).....	8
Figur 2.5: Kontorlandskap i ARC-bygget. Brukt med samtykke. Foto: ARC Arkitekter (2015).....	9
Figur 2.6: Plassering av radiatorar under vindaug hjå ARC Arkitekter.....	9
Figur 2.7: 2226 i Austerrike. Brukt med samtykke. Foto: Jakob Schoof (2014).....	10
Figur 2.8: Vindaugsseksjon i 2226. Brukt med samtykke. Foto: archphoto, inc. ©.....	11
Figur 2.9: Planløyising 2226. Brukt med samtykke. Foto: archphoto, inc. © (Baumschlager Eberle).....	11
Figur 2.10: Kontorlandskap i 2226. Brukt med samtykke. Foto: Jakob Schoof (2014).....	12
Figur 2.11: B&O hovudkvarter i Danmark. Biletet viser nordfasaden.....	13
Figur 2.12: Opne gangareal i hovudkvarteret til B&O. Brukt med samtykke.....	14
Figur 2.13: Samanheng mellom PMV og PPD.....	18
Figur 3.1: Sørfasade på NINA-huset. Brukt med samtykke frå driftsavdelinga ved NINA-huset.....	29
Figur 3.2: Akustiske tiltak i himling, NINA-huset. Foto: Ragni Melstveit.....	30
Figur 3.3: Kontorplass i ope landskap i.....	30
Figur 3.4: Varmeteknisk laboratorium. Foto: Ragni Melstveit.....	33
Figur 3.5: Lesesal i Varmeteknisk med plass til 57 studentar. Foto: Ragni Melstveit.....	33
Figur 3.6: Utklipp frå snitteikning 2-706 for Varmeteknisk.....	35
Figur 4.1: Resultat frå kalibrering av termoelement i isvatn, romtemperatur og varmt vatn.....	44
Figur 4.2: Kalibrering av CO ₂ -målarar.....	45
Figur 4.3: Oppsett og merking for lengder. Til venstre heng trådane med termoelement ned frå taket.....	46
Figur 4.4: Måleutstyret i bruk. Her vart det gjennomført ei måling tre meter inn i rommet. Skapet til høgre i biletet innehaltdt loggeutstyr.....	46
Figur 4.5: Vindaug nummer 4 med opningsareal rundt 0,62 m ²	47
Figur 4.6: Måleområdet med møblering, raudt merke viser plassering.....	48
Figur 4.7: Grafisk framstilling av målingar 1,5 og 2,5 meter langs veggen. Sjøkklufting gjennom vindaug 3. For desse målingane vart kontorpultane ei feilkjelde.....	48
Figur 4.8: Grafisk framstilling av målingar 0,0 og 0,5 meter langs veggen. Sjøkklufting gjennom vindaug 4... 49	49
Figur 4.9: Framstilling av rekkefylgje og tidsbruk for forsøk med sjokklufting. Totalt tidsforbruk for eit forsøk var 1,5 time.....	49
Figur 4.10: Plassering av CO ₂ -målarar ved måling i NINA-huset.....	50
Figur 4.11: Plassering av CO ₂ -målarar under forsøka på Varmeteknisk.....	51
Figur 5.1: Plassering av vêrstasjon på Living Lab. Bilete henta frå Google Maps (2016).....	53
Figur 5.2: Vindrose for normalperioden 1961-1990. Rundt 15 % av all vind gjennom året bles i retning sør-sørvest, med hastigheit mellom 0,1 – 5 m/s. Illustrasjon er generert via eklime.no.....	54
Figur 5.3: Hastigheit i ankelhøgde. Forsøket vart gjort utan oppvarming. Hastigheitar opp mot 0,8 m/s.....	56
Figur 5.4: Hastigheit i hovudhøgde. Målinga vart gjort utan oppvarming. Frå to meter og innover i rommet er krava til kategori C tilfredsstilt.....	56
Figur 5.5: Hastigheit i, ankelhøgde. Gjennomført med oppvarming. Det vart målt høge hastigheitar i store delar av rommet.....	57
Figur 5.6: Hastigheit i hovudhøgde. Forsøket vart gjort med oppvarming. Krava er tilfredsstilt frå to meter og innover i rommet.....	57
Figur 5.7: Hastigheit i snittet rett inn i rommet. Målinga vart gjort utan oppvarming. Det vart målt opptil 0,7 m/s langs golvet i heile målerområdet.....	58
Figur 5.8: Hastigheit i snitt frå kanten av vindauga. Målinga vart gjort utan oppvarming. Hastigheitar opp mot 0,6 m/s er observert langs golvet.....	59
Figur 5.9: Hastigheit i snittet rett inn i rommet. Forsøket vart gjort med oppvarming. Registrert hastigheiar opp mot 0,7 m/s langs golvet.....	60

Figur 5.10: Hastigheit i snitt i rommet frå kant av vindauga. Forsøket vart gjort med oppvarming. Det vart målt hastigheitar opp mot 0,7 m/s langs golvet.	61
Figur 5.11: Temperatur i hovudhøgde. Målinga vart gjort utan oppvarming i rommet. Temperaturane vil vere tilfredsstillande to meter inn i rommet.	63
Figur 5.12: Temperatur i ankelhøgde. Målinga vart gjort utan oppvarming. Verdiane for 1, 2 og 3 meter er interpolerte.	63
Figur 5.13: Temperatur i hovudhøgde. Forsøket vart gjort med oppvarming. Store delar av rommet vil ha tilfredsstillande temperatur, unnateke rett innanfor vindauga.	64
Figur 5.14: Temperatur i, ankelhøgde. Målinga vart gjennomført med oppvarming under vindauga. Verdiane for 1, 2 og 3 meter er interpolerte.	64
Figur 5.15: Temperatur i snittet rett inn i rommet frå midten av vindauga.	65
Figur 5.16: Temperatur i snittet inn i rommet frå kanten av vindauga. Målinga er gjort utan oppvarming. Temperaturgradienten er ikkje innanfor krava.	66
Figur 5.17: Temperatur i snittet rett inn i rommet. Målinga vart gjennomført med oppvarming.	67
Figur 5.18: Temperatur i snittet frå kanten av vindauga rett inn i rommet. Forsøket er utført med oppvarming. Temperaturgradienten er over 6 °C i måleområdet.	68
Figur 5.19: Samanlikning av CO ₂ -konsentrasjonar for NINA huset og Varmeteknisk.	70
Figur 6.1: Luftmengde som ein funksjon av minutt lufting i timen, gitt vindhastigheit 3 m/s.	75
Figur 7.1: Forenkla modell til simulering. IDA ICE.	77
Figur 7.2: Den aktuelle sonen for simulering. IDA ICE.	78
Figur 8.1: Utetemperatur gjennom døgnet for simulering, 14.januar 2016. IDA ICE.	81
Figur 8.2: Temperatur i gammalt bygg med lufting tre gonger om dagen. IDA ICE.	83
Figur 8.3: Temperatur i nytt bygg med lufting tre gonger. IDA ICE.	83
Figur 8.4: Luftkvalitet i eldre bygg med lufting tre gonger om dagen. IDA ICE.	84
Figur 8.5: Luftkvalitet i nytt bygg med lufting tre gonger om dagen. IDA ICE.	84
Figur 8.6: Misnøgde i kontorlandskap i eldre bygg ved lufting tre gonger. IDA ICE.	85
Figur 8.7: Misnøgde i kontorlandskap i nytt bygg ved lufting tre gonger. IDA ICE.	85
Figur 8.8: Temperatur i eldre bygning med lufting annankvar time. IDA ICE.	88
Figur 8.9: Temperatur i nyare bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.	88
Figur 8.10: Luftkvalitet i eldre bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.	89
Figur 8.11: Luftkvalitet i nytt bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.	89
Figur 8.12: Misnøgde i eldre bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.	90
Figur 8.13: Misnøgde i nytt bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.	90
Figur 8.14: Temperatur i eldre bygg med lufting kvar time. IDA ICE.	93
Figur 8.15: Temperatur i nytt bygg med lufting kvar time. IDA ICE.	93
Figur 8.16: Luftkvalitet i eldre bygg med lufting kvar time. IDA ICE.	94
Figur 8.17: Luftkvalitet i nytt bygg med lufting kvar time. IDA ICE.	94
Figur 8.18: Misnøgde i eldre bygg ved lufting kvar time. IDA ICE.	95
Figur 8.19: Misnøgde i nytt bygg med lufting kvar time. IDA ICE.	95
Figur B.1: Korrigering av hastigheit 1. Faktor: 0,882.	II
Figur B.2: Korrigering av hastigheit 2. Faktor: 1,049.	II
Figur B.3: Korrigering av hastigheit 3. Faktor 1,700.	III
Figur B.4: Korrigering av hastigheit 4. Faktor 1,102.	III
Figur B.5: Korrigering av hastigheit 5. Faktor: 1,137.	III
Figur B.6: Korrigering av hastigheit 6. Faktor 1,030.	IV
Figur B.7: Korrigering av hastigheit 7. faktor 1,130.	IV
Figur B.8: Korrigering av hastigheit 8. Faktor: 1,350.	IV
Figur B.9: Korrigering av hastigheit 10. Faktor: 1,354.	V
Figur C.1: Vindhastigheit 16. mars.	VI
Figur C.2: Vindhastigheit 17. mars.	VI
Figur C.3: Vindhastigheit 18. mars.	VII

Tabelliste

TABELL 2.1: OVERSIKT OVER ULIKE VINDAUGSTYPAR OG EVALUERING AV DEIRA EIGENSKAPAR. BASERT PÅ ROETZEL ET AL. (2010).....	7
TABELL 2.2: DEI ULIKE FAKTORANE FOR INNEMILJØ OG KVA DEI VERT PÅVERKA AV.....	16
TABELL 2.3: GRUNNLAG FOR PMV-INDEKS, 7-PUNKTS SKALAEN.	18
TABELL 2.4: ANBEFALTE GRENSEVERDIAR FOR PMV-INDEKSEN. (INGEBRIGTSEN, 2015).....	18
TABELL 2.5: TRE KATEGORiar FOR TERMISK MILJØ.	20
TABELL 2.6: TREKK- OG TEMPERATURKRAV I KONTORLANDSKAP.....	20
TABELL 2.7: BESKRIVING AV KATEGORIANE FOR ATMOSFÆRISK MILJØ. BASERT PÅ TABELL 1 I NS-EN 15251. (STANDARD NORGE, 2014).	22
TABELL 2.8: DØME PÅ CO ₂ -KONSENTRASJONAR HØGARE ENN UTANDØRS KONSENTRASJON. BASERT PÅ TABELL NA.9, NS-EN 15251 (STANDARD NORGE, 2014).....	22
TABELL 2.9: KONSEKVENNS AV HØGE CO ₂ -KONSENTRASJONAR. BASERT PÅ INGBRIGTSEN (2015).	23
TABELL 2.10: VERDIAR FOR KONSTANTANE C ₁ , C ₂ OG C ₃ VED FORSKJELLIGE VINDRETNINGAR.....	27
TABELL 3.1: BYGGTEKNISKE DATA FOR NINA-HUSET.	30
TABELL 3.2: BEREKNING AV U-VERDI I DEKKER, NINA-HUSET.	31
TABELL 3.3: SAMANDRAG AV BYGGTEKNISKE DETALJAR FOR VARMETEKNISSK 34	34
TABELL 3.4:BEREKNING AV U-VERDI FOR YTTERVEGG, VARMETEKNISSK.....	36
TABELL 3.5: BEREKNING AV U-VERDI FOR DEKKER I VARMETEKNISSK.	36
TABELL 4.1: OVERSIKT OVER MONTERINGSHØGDER FOR HASTIGHEITSMÅLARAR.	41
TABELL 4.2: SPESIFIKASJONAR FOR HASTIGHEITSMÅLARANE. HENTA FRÅ TSI INCORPORATED (2013).....	41
TABELL 4.3: BEREKNING AV MAKSIMALT AVVIK FOR HASTIGHEITSMÅLINGAR.	42
TABELL 4.4: FAKTORAR BRUKT FOR Å KORRIGERE MÅLTE HASTIGHEITAR 42	42
TABELL 4.5: MONTERINGSHØGDER FOR TERMOELEMENT.....	43
TABELL 4.6: EIGENSKAPAR TIL CO ₂ -MÅLARANE (VAISALA, 2001, KIMO INSTRUMENTS, U.D.)	45
TABELL 5.1: STANDARDAVVIK FOR MÅLINGAR I SNITTET 0,5 METER LANGS VEGGEN, UTAN OPPVARMING. TALA ER HENTA FRÅ MÅLINGANE TEKE EIN METER INN I ROMMET, DER DET VAR FORVENTA OMRÅDE MED HØG HASTIGHEIT.....	69
TABELL 6.1: BEREKNING AV PROSENT MISNØGDE GRUNNA TREKK.....	71
TABELL 6.2: BEREKNING AV PROSENT MISNØGDE PERSONAR GRUNNA VERTIKAL TEMPERATURGRADIENT.	72
TABELL 6.3: BEREKNA NØDVENDIG LUFTMENGDE I ROMMET.....	73
TABELL 6.4. PARAMETRAR SOM VART NYTTA I BEREKNING FOR MATEMATISKE MODELLAR.	74
TABELL 6.5: UTREKNA LUFTMENGDER FOR ULIKE VINDHASTIGHEITAR.....	74
TABELL 7.1: INNDATA I IDA ICE.....	78
TABELL 7.2: PARAMETRAR SOM ER ULIKE FOR NYTT OG ELDRE BYGG.....	78
TABELL 7.3:TIDSSKJEMA FOR LUFTING MED VINDAUGE TRE GONGER I LØPET AV ARBEIDSDAGEN.	79
TABELL 7.4: TIDSSKJEMA FOR LUFTING ANNANKVAR TIME.	80
TABELL 7.5: TIDSSKJEMA FOR LUFTING KVAR TIME.....	80

Forkortingar

DR	Draught Rate. Prosentdel misnøgde grunna trekk
IDA ICE	IDA Indoor Climate and Energy (simuleringsprogram)
NINA	Norsk institutt for naturforskning
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
PD	Percentage Dissatisfied. Prosentdel misnøgde grunna temperatur
PMV	Predicted Mean Vote. Forventa middelvotering
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied. Forventa prosentdel misnøgde personar
PPM	Parts per Million
SBS	Sick Building Syndrome
VAV	Variabel Air Volume

1. Innleiing

Rapporten omhandlar bruk av naturleg ventilasjon i kontorbygg og kva innverknad dette vil ha på komforten til brukarane. Oppgåva er knytt til forskingsprosjektet *Naturlig klimatisering av framtidige energieffektive kontorbygg*, også kalla *Naturligvis*. Prosjektet vart starta i 2015 av Skanska, og denne oppgåva er gitt av SINTEF Byggforsk som ein del av *Naturligvis*-prosjektet. Det overordna målet for forskingsprosjektet er å finne løysingar for naturleg klimatisering, slik at ein i framtidige bygg kan minske energi brukt til ventilasjon og oppvarming (Forskningsrådet, 2015).

1.1 Bakgrunn

I dag står bygningar for over 40 % av verdas energiforbruk (Nordby, 2009). På bakgrunn av aukande energibruk og utslepp av klimagassar har det blitt stadig større fokus på energi og miljø, både her til lands og andre stader. Dette har resultert i fleire nasjonale rapportar knytt til reduksjon av energibruk. *Klimakur 2020* kom ut i 2010, der det vart presentert fleire løysingar for å redusere energibruk i bygningar. Eit av forslaga gjekk ut på å stille strengare krav til byggesektoren gjennom tekniske forskrifter (Klima- og forurensningsdirektoratet og Statens vegvesen, 2010). Som eit svar på dette kom det ei revidert utgåve av TEK10 den 1. januar 2016, mens det er forventa ny teknisk forskrift i 2017 (Direktoratet for byggkvalitet, 2016). Byggjenæringa sjølv har også byrja å endre sine byggeskikkar. Fleire bedrifter søker sjølv til meir miljøvenlege alternativ og det vert vanlegare å høyre om lågenergi-, passiv- og plusshus.

For å faktisk redusere energibruk er det ikkje berre nødvendig å forbetre dagens løysingar – men også prøve å kome med nye og betre alternativ. I yrkesbygg var naturleg ventilasjon einaste valet fram til 1950-talet då mekanisk ventilasjon gjorde sitt inntog (Ingebrigtsen, 2015). No er atter eingong naturleg ventilasjon kome i søkjelyset, og fleire yrkesbygg som nyttar naturlege drivkrefter er allereie ferdigstilte og tekne i bruk. Det auka fokuset på energibruk har ført til eit ynskje om å redusere energi til oppvarming og ventilasjon. Sidan naturleg ventilasjon er svært energigjerrig vert dette sett på som eit reelt alternativ. I samband med dette er det interessant å finne ut meir om korleis naturleg ventilasjon vil fungere i kalde klima som her i Noreg.

1.2 Problemstilling

Hensikta med denne oppgåva er å undersøkje korleis naturleg ventilasjon vil påverke komforten i kontorlandskap, ved låge utetemperaturar. Gjennom oppgåva vert fylgjande problemstillingar undersøkt:

- Moglegheita for bruk av vindaugslufting ved utetemperaturar under 10 °C
- I kva grad det er mogeleg å nytte naturleg ventilasjon i dagens planløysing
- Korleis naturleg ventilasjon vil påverke termisk komfort i opphaldssona

1.3 Avgrensing

Opphavelig var planen å gjennomføre alle målingane i kontorlokala til *Norsk institutt for naturforskning*, NINA-huset, i Trondheim. På grunn av forseinkingar i levering av nødvendig utstyr vart dette ikkje mogeleg sidan planlagt tidspunkt for måling måtte utsetjast. Måleutstyret skulle nyttast i andre prosjekt etterpå, og for å vere sikker på å måle ved kalde utetemperaturar var det ikkje tid til å leite etter andre aktuelle kontorbygg. Målingane vart difor gjennomført på Varmeteknisk laboratorium på lesesal for studentar. Denne endringa har hatt stor innverknad på oppgåva i si heilheit, og har ført til nokre forskjellar frå den opphavelige planen.

Det vart gjennomført målingar for kontinuerleg lufting. Målingane blei gjort med eit topphengsla vindauge som vart snudd opp ned. Dette vart tilnærma eit botnhengsla vindauge som opna utover. Løysinga var ikkje optimal, og målingane for kontinuerleg lufting har difor ikkje blitt vidare behandla i denne rapporten.

1.4 Disposisjon

Kapittel 2 inneheld teori og litteraturstudie for ventilasjon og inneklima. Det vert fokusert på naturleg ventilasjon og vindaugslufting, termisk og atmosfærisk miljø. Matematiske modellar for berekning av luftmengder vert presentert. I denne oppgåva er det nytta to ulike bygningar som referansebygg, NINA-huset og Varmeteknisk laboratorium. Nødvendig informasjon om bygga er gitt i kapittel 0. Vidare vert metode og gjennomføring for målingar presentert i kapittel 0 og resultatata frå målingane i kapittel 0.

Analyse av termisk komfort ut frå resultatata av målingane og dei matematiske modellane er utført i kapittel 6. Gjennomføring av simulering i IDA ICE og resultat frå denne er gitt i kapittel 0 og 8. Diskusjon og konklusjon av resultatata funne gjennom oppgåva er i kapittel 9 og 0, mens forslag til vidare arbeid vert presentert i kapittel 0.

Det vert antekt at lesaren har god teknisk innsikt og kjenner til dei vanlegaste uttrykka på fagområdet.

2. Teori

I dette kapittelet er relevant teori presentert. Fyrst kjem det ein kort gjennomgang av grunnleggjande teori i kvart delkapittel, deretter fylgjer det eit litteraturstudie av tidlegare arbeid på feltet.

2.1 Naturleg ventilasjon

Naturleg ventilasjon baserer seg på naturlege drivkrefter som vind og termisk oppdrift. I dette delkapittelet er det kort presentert grunnleggjande informasjon. Det er utført eit meir utfyllande litteraturstudie med forskning på vindaugslufting, og eksisterande kontorbygg og korleis ventilasjonen fungerer i desse bygga.

Det er ei kjend problemstilling om naturleg ventilasjon er fordelaktig å bruke i yrkesbygg. Det vert ofte trekt fram negative sider som trekkproblematikken, støy og at utelufta ikkje vert filtrert. Derimot vil det ikkje vere vifter som støyer eller treng energi, noko som gjer det svært energieffektivt i seg sjølv. Ein anna hindring er mangel på varmeattvinning og at det kan gå mykje energi til romoppvarming (Ingebrigtsen, 2015).

2.1.1 Drivkrefter

Det er to drivkrefter som er gjeldande i naturleg ventilasjon: termisk oppdrift og vind. For å få luftskifte inne i eit bygg ved hjelp av naturleg ventilasjon, er ein avhengig av enten ein viss vindhastigheit eller temperaturforskjell mellom inne- og utetemperatur. Låge hastigheitar og liten temperaturforskjell medfører låge luftmengder og dårleg ventilering av rommet. Det motsette gjeld ved kaldt vêt og mykje vind, då det er fare for at det oppstår trekk (Ingebrigtsen, 2015). Effekten av naturleg ventilasjon vert også påverka av terrenget rundt bygget og bygningens utforming. Eldre bygg har ofte høgt lekkasjetal, og vil dermed gje betre utteljing av naturleg ventilasjon enn til dømes eit nytt bygg med lågt lekkasjetal og tett bygningskropp.

Vindens innverknad på inneklimate i ein bygning vert påverka av fleire faktorar. Vindhastigheit, byggets formfaktor og terrengruheitsfaktoren vil vere ulik for alle bygg. Vindtrykket på bygningen kan bereknast frå formel (2.1). Samtidig vil vinden stadig endre retning og hastigheit, noko som igjen vil endre byggets formfaktorverdi (Ingebrigtsen, 2015).

$$\Delta p = C \cdot c_r(z) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2.1)$$

C	Bygningens formfaktorverdi [-]
$c_r(z)$	Terrengruheitsfaktoren [-]
ρ	Luftas tettheit [kg/m ³]
v	Vindhastigheita [m/s]

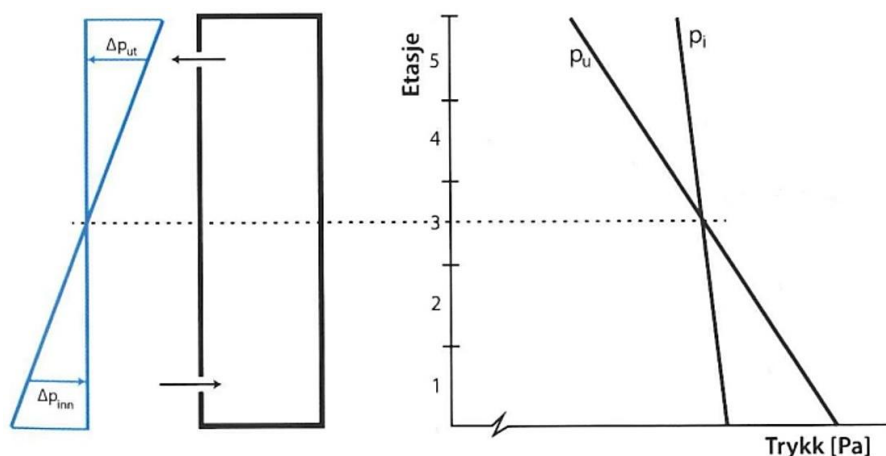
Vindtrykket mot ein bygningsfasade vil skape eit overtrykk på vindsida. På lesida av bygget vil det dermed oppstå eit undertrykk som er større enn overtrykket på vindsida. Trykkdifferansen mellom over- og undertrykk vil skape ein luftstraum gjennom bygget (Ingebrigtsen, 2015, Novakovic et al., 2007).

Termisk oppdrift er basert på temperaturforskjell mellom lufta inne og ute. Luftrørslene vert danna av ulik tettheit i varm og kald luft. Varm luft vil stige og føre til at kald luft vert dregen inn i nedste del av bygningen. Det totale drivtrykket frå termisk oppdrift er gitt i formel (2.2), henta frå Ingebrigtsen (2015):

$$\Delta p = \Delta p_{inn} + \Delta p_{ut} = (\rho_u - \rho_i) \cdot g \cdot H = \rho_0 \cdot \left(\frac{273}{T_u} - \frac{273}{T_i} \right) \cdot g \cdot H \quad (2.2)$$

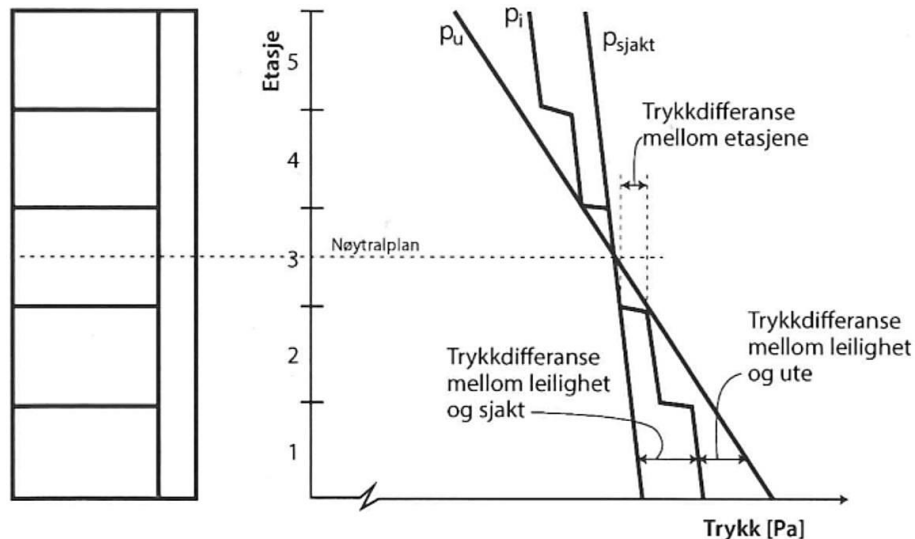
Δp_{inn}	Trykk på utsida av veggen [Pa]
Δp_{ut}	Trykk på innsida av veggen [Pa]
ρ_u	Luftas tettheit på utsida [kg/m^3]
ρ_i	Luftas tettheit på innsida [kg/m^3]
g	Tyngdeakselerasjonen [m/s^2]
H	Total høgde mellom opningane [m]
ρ_0	Luftas tettheit ved 0 °C [kg/m^3]
T_u	Temperatur ute [K]
T_i	Temperatur inne [K]

I høge bygg vil oppdrifta vere svært avhengig av om bygningen har opne eller lukka etasjeskilje. I Figur 2.1 er det vist korleis trykkforskjellen oppstår i eit høgt bygg dersom heile bygget er ope utan etasjeskilje. Oppdrifta vil føre til at kald luft vert ført inn i dei nedste etasjane og kan føre til trekk og diskomfort. Dei øvste etasjane kan derimot plagast med varm og klam luft og det kan vere fare for fuktskader på bygget.



Figur 2.1: Trykkforskjell i høgt bygg utan innvendige etasjeskilje. Brukt med samtykke. (Ingebrigtsen, 2015).

Figur 2.2 viser eit høgt bygg med lukka etasjar og sjakt som går gjennom alle etasjeskilja. Trykkdifferansen vert redusert samanlikna med eit bygg med heilt tette etasjar fordi sjakta vil fungere som ein «trykkbuffer». Trappesjakta vil dermed jamne ut trykket i bygget og dei termiske kreftene vert reduserte samanlikna med Figur 2.1. I slike tilfelle vil infiltrasjon og eksfiltrasjon også avta (Ingebrigtsen, 2015).



Figur 2.2: Trykkforskjell i høge bygningar med ope trapperom og heissjakt. Brukt med samtykke. (Ingebrigtsen, 2015).

2.1.2 Ventilasjonssprinsipp

Utnytting av naturlege drivkrefter vert ofte delt opp i tre kategoriar:

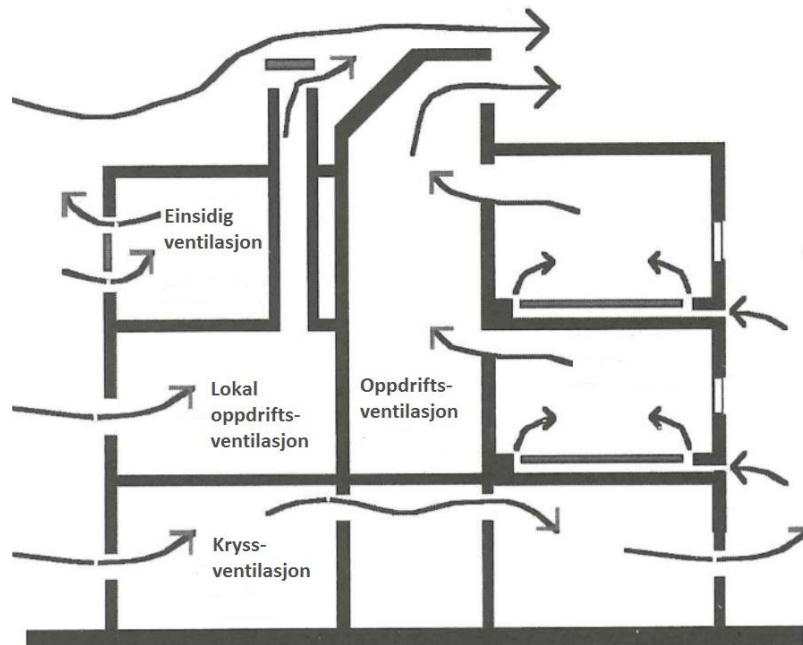
- Einsidig ventilasjon
- Kryssventilasjon
- Oppdriftsventilasjon

For einsidig ventilasjon vil det berre vere opningar på eine sida av rommet. Utfordringar med denne type ventilasjon er at luftstraumen ofte er vanskeleg å kontrollere, og kan ha avgrensa effekt innover i rommet. På vinterstid vil vind vere den mest dominerande drivkrafta, men termisk oppdrift kan også påverke ved rette temperaturforhold.

Kryssventilasjon har opningar på to eller fleire sider av rommet. Luft kan strøyme gjennom rommet eller bygningen og kan oppnå høge ventilasjonsratar, samtidig som det vil påverke lufta i store deler av rommet. Vind er den største drivkrafta og termisk oppdrift vil berre påverke viss det er stor høgdeforskjell mellom opningane.

Oppdriftsventilasjon vil gjelde for bygningar som har opningar både lågt og høgt oppe på bygningskroppen. Termisk oppdrift vil vere den dominerande drivkrafta i desse tilfella, men ved god plassering av til dømes pipe eller sjakt vil vindtrykk også kunne verke inn på luftstraumen (Awbi, 2003, Awbi, 2008).

I fylgje Santamouris og Wouters (2006) kan ein kombinasjon av alle desse tre gje best resultat sidan det vil utnytte drivkreftene på best mogelege måte i kvart rom, som vist i Figur 2.3. Einsidig ventilasjon kan brukast enkeltvis i rom der det trengs, mens kryssventilasjon kan nyttast for lufting i ein heil etasje. Ved bruk av oppdriftsventilasjon kan heile bygningen luftast samtidig, avhengig av design og indre utforming.



Figur 2.3: Naturlege ventilasjonsprinsipp. Basert på Santamouris og Wouters (2006).

2.1.3 Tidlegare forskning på vindaugslufting

I naturleg ventilerte bygg vil storleik og utforming på lufteopning ha stor betydning. Val av vindauge er ofte teke på bakgrunn av arkitektoniske ynskje, men klimatiske forhold har også stor påverknad. Spesielt i klima med mykje nedbør vil skydd mot vêret vere viktig. Forventa ventilasjonseffekt frå vindauge kan delast inn i to faktorar: type opning på vindauge, og storleik og plassering av vindauga i fasaden (Roetzel et al., 2010). Ei samanlikning av fem ulike vindaugstypar og eigenskapar er utført av Roetzel et al. (2010), som vist i Tabell 2.1.

Yun et al. (2008) utførte ein undersøking på brukarvanar i samanheng med vindaugslufting. Personar som opplevde høg kontroll av sine egne omgivadar, til dømes gjennom tilgang til vindaugslufting, ville ha ein tendens til å bruke dette meir aktivt enn personar med liten kontroll på inneklimaet. Forsøk viste at moglegheita for å påverke inneklimaet sjølv førte til høgare termisk tilfredsheit og meir aktiv bruk av vindaugslufting.



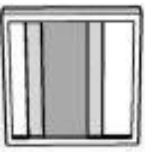
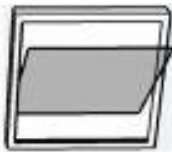
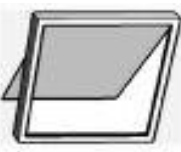
Liknande vart også funne av (Brager et al., 2004), der feltforsøk vart utført på personar med likt aktivitetsnivå, klede og termiske omgivadar. Reaksjonen deira vil derimot vere svært ulik, då personar som kunne påverke omgivnadane vil oppfatte den termiske tilstanden svært lik dei reelle forholda. Personar som ikkje kunne styre vindaugstet sjølv viste mindre tilfredsheit med omgivnadane, og opplevde større variasjon frå dei reelle termiske forholda. Resultata var basert

på over 1000 svar, samla frå både kjøle- og varmesesong med høvesvis innandørs operativ temperatur på 22,9 °C og 24,1 °C. Forsøket var utført i ein naturleg ventilert bygning.

Von Grabe et al. (2014) har utført ein studie på ventilasjonseffektivitet for ulike vindaugstypar med oppdrift som drivkraft. Seks ulike vindaugstypar vart testa. Vindaugstypen som kom dårlegast ut med tanke på luftstraum gjennom opninga og CO₂-fjerning frå rommet var topp- og botnhengsla vindauge. Sidehengsla vindauge gjorde det betre, og beste vindaugstypen var horisontaldreidd vindauge med opning oppover. Forsøket vart utført i testkammer med vindauge med storleik 1,23 × 1,48 meter, og med ulike størrelsar på opningsarealet. Alle resultatata vart normalisert til ein temperaturforskjell på 1 Kelvin.

Ein dansk studie frå 2001 viste at ved samanlikning av to ulike vindaugstypar, botnhengt og sidehengt, vil det botnhengte vere det beste valet på vinterstid ved einsidig ventilasjon. Grunnen til dette var at utelufta vart tilført utanfor opphaldssona og kunne kontrollerast av opningsvinkel på vindauga. Botnhengt vindauge med dimensjon 1,6 × 0,4 meter vart montert 10 cm under taket, mens det sidehengsla med storleik 0,81 × 1,38 m vart montert 1 meter over golvet. Det vart testa for opningar opp til 0,045 m² for det botnhengte og opp til 0,62 m² for det sidehengte (Heiselberg et al., 2001).

Tabell 2.1: Oversikt over ulike vindaugstypar og evaluering av deira eigenskapar. Basert på Roetzel et al. (2010)

	Sidehengsla vindauge Opnar innover	Botnhengsla vindauge Opnar innover	Glidande opning	Horisontal dreieing Nedste del opnar utover	Topphengsla vindauge Opnar utover
					
Skydd mot vêret	Dårleg	Bra	Dårleg	Medium	Medium
Størst mogleg ventilasjonsrate	Bra	Dårleg	Medium	Bra	Medium
Regulering av opningsstørrelse	Bra	Dårleg	Bra	Bra	Bra
Fleksibilitet for møblering	Dårleg	Bra	Bra	Medium	Bra

2.1.4 Eksisterande bygg med naturleg ventilasjon

Tre kontorbygg som nyttar naturlege drivkrefter til ventilasjon er vurdert. Faktorane lagt til grunn for valet av bygg som nytta naturleg eller hybrid ventilasjon, hadde kontorlandskap og var relativt nye bygg designa etter dagens arbeidsmetodar. Spesielt var ein innverkande faktor at bygget var prosjektert med tanke på mykje teknisk utstyr og til tider høge internlaster frå utstyr, belysning og personar.

2.1.4.1 ARC Arkitekter, Trondheim

I 2014 flytta ARC Arkitekter inn i eit tidlegare fryselager, Figur 2.4, i Trondheim. Bygget vart totalrenovert og framstår i dag som eit moderne kontorbygg. Heile bygningen er no nytta som kontor og består av både opne kontorlandskap og mindre møterom. Det er installert hybrid ventilasjon med mekanisk ventilasjonsanlegg, kombinert med automatisk lufting. Vindauge i tak og fasade er kopla til automatisk styringssystem og vert opna etter behov basert på CO₂- og temperaturmålingar i bygget. Radiatorar, motordrivne vindauge og det mekaniske ventilasjonssystemet er samkjørte for å få best mogleg inneklime (ARC Arkitekter, 2015).

Som Figur 2.6 viser er det gangareal langs kjernen i bygget og kontorpultar er plassert langs yttervegg. På Figur 2.5 er det vist er pultar plassert med vekk frå fasaden for å unngå strålingsasymmetri og kaldras frå kalde flatar.



*Figur 2.4: Vestre Kanalvei 20 i Trondheim. Brukt med samtykke.
Foto: ARC Arkitekter (2015)*



Figur 2.6: Plassering av radiatorar under vindauge hjå ARC Arkitekter. Brukt med samtykke. Foto: ARC Arkitekter (2015)



Figur 2.5: Kontorlandskap i ARC-bygget. Brukt med samtykke. Foto: ARC Arkitekter (2015)

2.1.4.2 2226, Lustenau

2226 er eit kontorbygg, sjå Figur 2.7, lokalisert i Lustenau, Austerrike. Bygget stod ferdig i 2013, der arkitektfirmaet Baumschlager Eberle både har designa bygget og er brukar av bygget. Tanken bak bygningen var å vere ei motvekt mot den aukande bruken av teknologi i moderne bygningar. Målet var å byggje slik at fasaden og bygningskroppen saman skulle skape eit godt inneklima.



Figur 2.7: 2226 i Austerrike. Brukt med samtykke. Foto: Jakob Schoof (2014).

Oppvarming

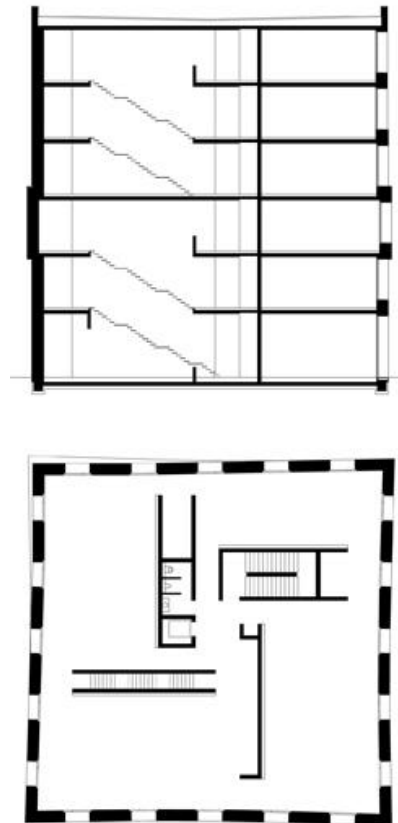
Det er verken installert anlegg for oppvarming, kjøling eller ventilasjon i bygget. Likevel skal bygget halde ein innetemperatur på 22 - 26 °C, derav namnet, gjennom heile året ved hjelp av termisk masse. Bygningskroppen er bygd opp av to ulike lag der det ytre fungerer som eit isolerande lag, mens det inste laget er bærande konstruksjon. Sidan det ikkje er installert noko system for oppvarming, er interne laster og solinnstråling hovudkjelda til varme. Det meste av varmen kjem difor frå personar, belysning og teknisk utstyr sidan solinnstråling er redusert for å unngå overoppheting. På dei kaldaste vinterdagane kjem belysninga på tidleg for å bidra til ekstra varme i bygget (Eberle og Aicher, 2016).

Ventilasjon

I fasaden er det montert automatiske luker ved sidan av vindauga, sjå Figur 2.8. Luftelukene er styrt etter CO₂-nivået i rommet, men kan også styrast manuelt av brukarane om det er ynskjeleg. Om vinteren opnar lukene seg berre på bakgrunn av CO₂-konsentrasjon. Om sommaren vert lukene også opna på natta for å kjøle ned rommet og den termiske massen. Etasjane har takhøgde på 3,36 meter slik at varm og forureina luft akkumulerer seg høgt i rommet og forbetrar luftkvaliteten i opphaldssona. Når CO₂-nivået i rommet når 1200 ppm, vil lukene opne seg, heilt til konsentrasjonen fell under 800 ppm. Bygget har ei planløysing med færre innerveggar enn i eit vanleg kontorbygg. Dette gjer bygningen fleksibel for eventuelle endringar i bruksområde, samtidig som det gjev moglegheit for kryssventilasjon i kvar etasje. Som snitteikninga øvst på Figur 2.9 viser, er det lukka etasjar med ope trapperom gjennom heile bygget. Eit typisk kontorlandskap er vist i Figur 2.10, med store areal og karakteristiske vindaugsseksjonar. (Baumschlager Eberle, Schoof, 2014, Eberle og Aicher, 2016).



Figur 2.8: Vindaugsseksjon i 2226. Brukt med samtykke. Foto: archphoto, inc. © (Baumschlager Eberle)



Figur 2.9: Planløysing 2226. Brukt med samtykke. Foto: archphoto, inc. © (Baumschlager Eberle)



Figur 2.10: Kontorlandskap i 2226. Brukt med samtykke. Foto: Jakob Schoof (2014)

2.1.4.3 Bang & Olufsens hovudkvarter, Danmark

I 1998 fekk Bang & Olufsen (B&O) nytt hovudkvarter i Struer, Danmark. Bygget består av tre kontorfløyar som vert ventilerte med naturleg ventilasjon når det er mogeleg, og nyttar hybrid ventilasjon resten av tida. Kontorbygget er laga i tunge materialer for å kunne utnytte den termiske massen ved nattkjøling.

Nordfasaden består av store glasflatar, mens sørfasaden derimot har lange horisontale vindaugsrekkjer i ytterveggen av tegl. Vindauga i sørfasaden kan opnast manuelt, mens dei i nordfasaden er mekanisk styrte. Figur 2.11 viser nordfasaden med store vindaugsflatar. Sørfasaden har relativt lite glasareal for å hindre store varmetilskot frå sola. Det er totalt tre etasjar, som består av både cellekontor og kontorlandsskap (Monby og Vestergaard, 1998, Aalborg Universitet, 2008).



Figur 2.11: B&O hovudkvarter i Danmark. Biletet viser nordfasaden. Brukt med samtykke. Foto: Thomas Juul.

Ventilasjon

Smale vindaug er plassert i nedre del av fasaden og kjølig luft vert tilført ved golvet. Fortrengingsventilasjon fører varm og forureina luft til opne areal, til dømes areala som er vist i Figur 2.12. Deretter går lufta ut i trappesjaktene i bygget, der avtrekkshetter trekker lufta opp og ut. Dei mekaniske vindauga kan styrast ut frå tre strategiar:

- Konstant drift
- CO₂-nivå
- Nattdrift

Styringsstrategien har visse avgrensingar for å unngå trekk og påverknad av vêret. Ut frå vindretning og –hastigheit vert vindauga automatisk lukka for å unngå gjennomtrekk i bygget. Viss vindhastigheita vert for høg, vert alle vindauga lukka, men det er mogeleg å opne vindauga manuelt. Når det er mykje vind og samtidig regn vert alle vindaug lukka, inkludert dei manuelt styrte vindauga i sørfasaden. Når temperaturen sig under 0 °C, vert all naturleg ventilasjon stogga. Viss utelufta er kald, vil den fyrst varmast opp av ribbevarmeflater montert rett innanfor vindaga. Dette er for å redusere risikoen for trekk (Monby og Vestergaard, 1998, Aalborg Universitet, 2008).



*Figur 2.12: Opne gangareal i hovudkvarteret til B&O. Brukt med samtykke.
Foto: Mikkel Hagstrøm.*

2.2 Inneklima

To omgrep er viktige å skilje i denne samanhengen; inneklima og innemiljø. WHO har definert *innemiljø* som alt som omjev og påverkar oss, inkludert det estetiske og det psykososiale miljøet. *Inneklima* omfattar termisk, atmosfærisk, akustisk, aktinisk og mekanisk miljø. Enkelt forklart er inneklima ein del av omgrepet innemiljø (Novakovic et al., 2007). Påverkande faktorar og parametraner er presentert i Tabell 3.1, laga etter Ingebrigtsen (2015) si framstilling av dei sju faktorane for innemiljø.

Sidan det i Noreg er det vanleg å opphalde seg innandørs opptil 90 % av tida, er det utarbeidd lover og forskrifter for å sikre eit godt inneklima og arbeidsmiljø. Blant anna stiller Plan- og bygningslova med *Byggteknisk forskrift* krav til inneklima i bygningar (*Direktoratet for byggkvalitet, 2011*). Kapittel 13 i TEK10 stiller krav til luftkvalitet og luftmengder både for bustadar og næringsbygg. Arbeidsmiljølova inneheld ei rettleiing gitt av Arbeidstilsynet. *444 Veiledning om klima og luftkvalitet på arbeidsplassen* har krav til temperaturar og luftmengder på arbeidsplassen (Arbeidstilsynet, 2013c). Standard Norge (2014) sin *Inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse* er også ein viktig standard i denne samanheng, der det vert stilt krav til innetemperaturar og liknande.

Området desse krava må tilfredsstillast er i NS-EN 13779 definert som opphaldssona (Standard Norge, 2007). Opphaldssona er den delen av rommet det normalt vil vere personar i, og Ingebrigtsen (2015) avgrensar sona med parallelle flater til veggjar, golv og tak. Frå golv til sona er 0,05 meter opp til 1,8 meter. Frå yttervegg er det 0,6 meter, mens for innervegg gjeld 0,2 meter. I det nemnde området må altså krav til temperaturar, forureining og lufthastigheit tilfredsstillast.

Korleis ein opplever inneklimaet er svært individuelt, sidan alle reagerer forskjellig på ulike faktorar som til dømes temperatur, lukt og trekk. Ofte vert det utarbeidd eit "kompromissklima", der ein går ut frå at dei aller fleste vil vere nøgde med omgivnadane. Viss denne faktoren er låg, bør det vurderast tiltak for å senke prosentdel misnøgde personar (Novakovic et al., 2007, Ingebrigtsen, 2015). Denne oppgåva har hovudvekt på termisk komfort og ventilasjon og fokuset vil liggje på termisk og atmosfærisk miljø.

Tabell 2.2: Dei ulike faktorane for innemiljø og kva dei vert påverka av. Basert på Ingebrigtsen (2015).

Faktorar	Krav	Parameter	Påverkast av
Termisk miljø	Menneskets varmebalanse	<ul style="list-style-type: none"> • Lufttemperatur • Vertikal temperaturgradient • Strålingstemperatur • Lufthastighet • Luftfuktighet 	<ul style="list-style-type: none"> • Påkledning • Oppholdstid • Aktivitetsnivå • Sinnstilstand
Atmosfærisk miljø	Opplevd luftkvalitet	<ul style="list-style-type: none"> • Gassar • Lukt • Kjemiske stoff • Partiklar 	<ul style="list-style-type: none"> • Lufttemperatur • Luftfuktighet • Oppholdstid
Akustisk miljø	Lyd og støy	<ul style="list-style-type: none"> • Ulike frekvensar • Etterklangstid • Lågfrekvent støy • Infralyd 	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrasjonar • Romakustikk
Aktinisk miljø	Strålingsmiljø	<ul style="list-style-type: none"> • Belysningsnivå • Dagslysnivå • Lyskjeldas fargeeigenskapar • Blending • Flimring 	<ul style="list-style-type: none"> • Radiobølger • Elektriske felt • Radon • Radioaktiv stråling
Mekanisk miljø	Fysiske omgivadar	<ul style="list-style-type: none"> • Ergonomi • Tilpassing av arbeidsplassen • Apparat 	<ul style="list-style-type: none"> • Sittestilling • Møblering
Estetisk miljø	Omgivnadane	<ul style="list-style-type: none"> • Det som påverkar sansane våre 	<ul style="list-style-type: none"> • Individuelt
Psykososialt miljø	Mellommenneskelege faktorar	<ul style="list-style-type: none"> • Sosialt miljø • Interaksjon 	<ul style="list-style-type: none"> • Kjensler

2.2.1 Termisk miljø

Termisk miljø er definert som den menneskelege varmebalansen og termisk komfort. For å oppnå termisk tilfredsheit må kroppens kjernetemperatur og hudtemperatur gje ei kjensle av termisk nøytralitet og energirekneskapet må vere i balanse. Varmebalanselikninga er vist i likning (2.3) og henta frå P.O Fanger (1970). Det termiske miljøet er påverka av lufttemperaturen, midla strålingstemperatur, luftas hastigheit og turbulens, og relativ luftfuktigheit (Novakovic et al., 2007).

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = K = R + C \quad (2.3)$$

H	Intern varmeproduksjon [W/m ²]
E_d	Varmetap ved diffusjon gjennom huda [W/m ²]
E_{sw}	Varmetap ved sveitte [W/m ²]
E_{re}	Varmetap ved fordamping av vatn gjennom respirasjon [W/m ²]
L	Varmetap ved respirasjon av tørr varme [W/m ²]
K	Varmetransport frå huda gjennom klede [W/m ²]
R	Varmetap ved stråling [W/m ²]
C	Varmetap ved konveksjon [W/m ²]

Novakovic et al. (2007) har definert termisk komfort som "en sinnstilstand der vi uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelser". Det vil altså seie ein tilstand der ein verken ynskjer høgare eller lågare temperatur på omgivingane. Termisk komfort vert påverka av luftas tørrkuletemperatur, termisk stråling i rommet, luftas hastigheit og turbulens, aktivitetsnivå og bekleddningsnivå (Novakovic et al., 2007).

For å vurdere termisk miljø finns det to standardiserte indeksar; PMV- og PPD-indeksane. PMV, *predicted mean vote*, er eit uttrykk for den forventta middelvoteringa og korleis eit menneskje vil føle seg i forhold til det termiske miljøet. Indeksen er basert på 7-punktsskalaen som er vist i Tabell 2.3, der personane rangerer termisk miljø etter opplevd temperaturnivå. PPD står for *predicted percentage of dissatisfied*, og viser prosentvis kor mange misnøgde personar som kan forventast i ei større folkemengd. PPD-indeksen er nært knytt til PMV, som vist i Figur 2.13 og formel (2.4). Begge er henta frå NS-EN ISO 7730.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (2.4)$$

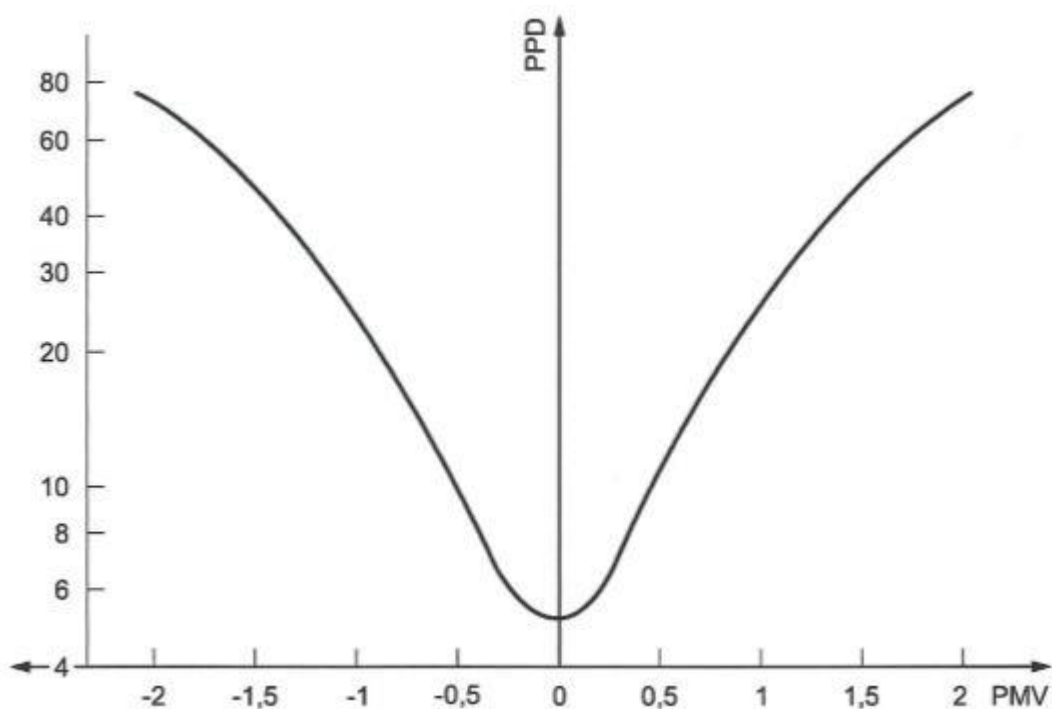
PMV-indeksen er berre anbefalt å bruke når PMV-verdiane ligg mellom -2 til +2, og når fylgjande verdiar ligg innanfor grensene vist i Tabell 2.4 (Standard Norge, 2006, Ingebrigtsen, 2015)

Tabell 2.3: Grunnlag for PMV-indeks, 7-punkts skalaen.
Basert på tabell 1 i NS-EN ISO 7730, Standard Norge (2006).

+3	Heit
+2	Varm
+1	Noko varm
0	Nøytral
-1	Noko kjølig
-2	Kjølig
-3	Kaldt

Tabell 2.4: Anbefalte grenseverdier for PMV-indeksen. (Ingebrigtsen, 2015).

Egenskap		Grenseverdi
M	Aktivitetsnivå	46 til 232 W/m ² (0,8 til 1,2 met)
I_{cl}	Bekledning	0 til 0,310 m ² K/W (0 til 2 clo)
T_a	Lufttemperatur	10 til 30 °C
$\overline{T_r}$	Middelstrålingstemperatur	10 til 40 °C
v_{ar}	Lufthastighet	0 til 1 m/s
p_{da}	Vassdampens partialtrykk	0 til 2700 Pa



Figur 2.13: Samanheng mellom PMV og PPD.
Brukt med samtykke, sjå vedlegg A. Standard Norge (2006).

PMV- og PPD-indeksane ser på korleis det termiske miljøet og kroppen i sin heilskap, men det kan likevel oppstå ubehag som påverkar deler av kroppen. Dette til tross for at PMV-indeksen tilseier termisk nøytralitet. For å sikre termisk komfort er det difor ikkje tilstrekkeleg med PMV-indeksen og det er utarbeida krav for lokalt ubehag og *lokal diskomfort*. Ved høgt aktivitetsnivå er ein mindre sensitiv for lokal påverknad, og spesielt utsette grupper for lokal diskomfort er difor stillesitjande personar med lågt aktivitetsnivå. Ubegag kan kome av trekk, stor vertikal temperaturgradient, varmt eller kaldt golv eller strålingsasymmetri (Ingebrigtsen, 2015). I denne rapporten vert det fokusert på trekk og vertikal temperaturgradient.

Termisk komfort og tilfredsheit er svært avhengig av luftrørsle og trekkjensle. Trekk vert ofte fyrst og fremst definert som lufthastigheit, men vil også påverkast av luftbevegelsar. Ved raskt fluktuerande luftstraumar vil oppfatta trekkjensle vere større, sjølv om varmetapet er likt som ved lågturbulente luftstraumar. I rom med mekanisk omrøringsventilasjon kan forventa turbulensintensitet vere mellom 30 og 60 %, mens naturleg ventilerte rom og i rom med fortrengingsventilasjon vil det vere lågare verdiar (Byggforsk, 1999). Turbulensintensiteten kan bereknast frå formel (2.5):

$$t_u = \frac{100 \cdot S_d}{v_a} \quad (2.5)$$

t_u	Turbulensintensitet [%]
S_d	Standardavviket for lufthastigheita [m/s]
v_a	Lokal gjennomsnittleg lufthastigheit [m/s]

Det er utvikla ein modell for å berekne prosentdel misnøgde personar grunna trekk som fører til lokal diskomfort, kalla DR, *draught rate*. Modellen er laga på grunnlag av forsøk gjort av P.O Fanger, der formel (2.6) kan brukast for utrekning av DR (Fanger et al., 1988, Novakovic et al., 2007, Standard Norge, 2006)

$$DR = (34 - t_{a,l})(\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} (0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot T_u + 3,14) \quad (2.6)$$

$t_{a,l}$	Lokal lufttemperatur, 20 til 26 C°
$\bar{v}_{a,l}$	Lokal middellufthastigheit < 0,5 m/s
T_u	Lokal turbulensintensitet 10 % til 60 % For DR > 100 %: bruk DR = 100 %

PD, *percentage dissatisfied*, er eit uttrykk for tal misnøgde personar grunna vertikal temperaturforskjell. Altså at ein opplever lokal diskomfort på grunn av stor forskjell i temperatur frå anklar til hovud. Formel (2.7) for berekning av PD er henta frå NS-EN ISO 7730 (Standard Norge, 2006).

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856 \cdot \Delta t_{a,v})} \quad (2.7)$$

$\Delta t_{a,v}$ Vertikal temperaturforskjell mellom ankel og hovud [C°]

Både DR og PD er tal misnøgte basert på lokal diskomfort. Eit fullstendig bilete av det termiske miljøet får ein fyrst i kombinasjon med PMV og PPD, som vist i Tabell 2.5. Tabellen er delt inn i tre ulike kategoriar for termisk innemiljø; A, B og C – som tilsvara høvesvis svært godt, godt og akseptabelt nivå. Vidare kan Tabell 2.6 brukast til å finne krava til temperatur og lufthastigheit i eit kontorlandskap. Tabellen gjeld for eit aktivitetsnivå på 70 W/m² som tilsvarar 1,2 met. NS-EN ISO 7730 anbefalar at PPD ligg under 10 %, noko som vil gje $-0,5 < PMV < +0,5$ ifylgje Tabell 2.5.

Tabell 2.5: Tre kategoriar for termisk miljø.
Basert på tabell A.1 i NS-EN ISO 7730 (Standard Norge, 2006).

Kategori ¹	Termisk tilstand for kroppen		DR %	Lokal diskomfort		
	PPD %	PMV -		PD % på grunn av		
				Vertikal temperatur-forskjell	Varmt eller kaldt golv	Strålings-asymmetri
A	< 6	- 0,2 < PMV < + 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	- 0,5 < PMV < + 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	- 0,7 < PMV < + 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Tabell 2.6: Trekk- og temperaturkrav i kontorlandskap.
Basert på tabell A.2 og A.5 i NS-EN ISO 7730 (Standard Norge, 2006).

Romkategori	Kategori ¹	Operativ temperatur °C		Vertikal temperatur-gradient ² °C	Maksimal middellufthastigheit m/s	
		Sommar	Vinter		Sommar	Vinter
Kontorlandskap	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	< 2	0,12	0,10
	B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	< 3	0,19	0,16
	C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	< 4	0,24	0,21 ³

¹ Kategoriane gjeld for NS-EN ISO 7730

² Temperaturforskjell mellom ankel og hovud, høvesvis 0,1 og 1,1 meter over golvet.

³ Under 20 C°-grense (Sjå figur A.2 i NS-EN ISO 7730)

Operativ temperatur er definert som den vektta verdien av luftas tørrkuletemperatur, t_a , og middelstrålingstemperaturen, t_r . Formel for å berekne operativ temperatur er gitt i likning (2.8) (Novakovic et al., 2007).

$$t_o = \frac{h_c \cdot t_a + h_r \cdot t_r}{h_c + h_r} \quad (2.8)$$

t_o	Operativ temperatur [°C]
h_c	Varmeovergangstal for konveksjon [W/m ² K]
t_a	Tørrkuletemperatur [°C]
h_r	Varmeovergangstal for stråling [W/m ² K]
t_r	Middelstrålingstemperatur [°C]

2.2.2 Atmosfærisk miljø

Atmosfærisk miljø omfattar luftas innhald av forureining, gassar, kjemiske stoffer og partiklar. Forureina luft kan føre til blant anna irritasjonar, astma og allergiar, og er viktig å fjerne frå inneklimate. Innandørs luftkvalitet kan bli påverka av fire faktorar; forureiningskjelder, ventilasjonssystem, rommets utforming og reinhald. For å sikre godt atmosfærisk miljø og korrekt luftmengde, finst det fleire krav til for eksempel CO₂-nivå og forureiningsnivå (Novakovic et al., 2007, Ingebrigtsen, 2015).

I TEK10 står det at: "Luftkvalitet i bygning skal være tilfredsstillende med hensyn til lukt og forurensning.", (Direktoratet for byggkvalitet, 2011). Dette er eit generelt formulert krav, men vert vidare spesifisert i *Veiledning om tekniske krav til byggverk: Kapittel 13 Miljø og helse*, der minstekrav til luftmengder og grunnventilasjon i ulike rom og bygningskategoriar er gitt. For yrkesbygningar er kravet at friskluftstilførsel skal vere minst 26 m³/t pr. person ved lett aktivitet. Når bygningen eller rommet er i bruk, er minstekravet 2,5 m³/t·m², og 0,7 m³/t·m² når det ikkje er i bruk (Direktoratet for byggkvalitet, 2010).

Det er stor forskjell på kva ein forventar til det atmosfæriske miljøet i ulike bygg. Ofte vil ein oppleve ulik luftkvalitet i nye og eldre bygg, og bygg med forskjellige bruksområde. Forventingsnivå er delt opp i fire kategoriar, presentert i Tabell 2.7.

Tabell 2.7: Beskriving av kategoriane for atmosfærisk miljø. Basert på tabell 1 i NS-EN 15251. (Standard Norge, 2014).

Kategori ⁴	Forklaring
I	Høgt forventningsnivå. Anbefalt i rom der svært sensitive og sårbare personar med spesielle behov oppheld seg, til dømes menneskje som har nedsett funksjonsevne, sjuke, spedborn eller eldre.
II	Normalt forventningsnivå. Bør brukast i nye og rehabiliterte bygningar.
III	Akseptabelt, moderat forventningsnivå. Kan brukast i eksisterande bygningar.
IV	Verdiar utanfor kriteria for kategoriane ovanfor. Denne kategorien bør berre godtas i ei avgrensa tid av året.

I Tabell 2.8 er det gitt anbefalte konsentrasjonar for CO₂, henta frå NS-EN 15251. Tabellen viser at ved stigande CO₂-konsentrasjon vil også prosent misnøgdde personar stige. Tabell 2.9 inneheld ulike nivå og krav til CO₂-konsentrasjon innandørs.

Tabell 2.8: Døme på CO₂-konsentrasjonar høgare enn utandørs konsentrasjon. Basert på tabell NA.9, NS-EN 15251 (Standard Norge, 2014)

Klasse	PPD	CO ₂ -konsentrasjon i ppm	
		Konsentrasjonsdifferanse mellom inne og ute	Konsentrasjon inne med 350 ppm ute
I	15	460	810
II	20	650	1000
III	20	650	1000
IV	> 20	> 650	> 1000

For arbeidsplassar er det spesielt to forskrifter som er førande; Arbeidsmiljølovas *Veiledning 444* og *Forskrift om Tiltaks- og grenseverdier*. Arbeidsmiljølova har minimumskrav til luftmengder og reinhald, mens forskrifta set maksimumsgrenser for innhald av gassar og kjemiske stoff i lufta (Arbeidstilsynet, 2013c, Arbeidstilsynet, 2013b). Folkehelseinstituttet (2015) har også eigne anbefalingar når det gjeld inneklime i alle typar bygg. Norma tilseier CO₂-konsentrasjonar 1800 mg/m³, tilsvarande 1000 ppm, for å unngå dårleg luftkvalitet.

⁴ Kategoriane gjeld for NS-EN 15251

Tabell 2.9: Konsekvens av høge CO₂-konsentrasjonar. Basert på Ingebrigtsen (2015).

CO ₂ -konsentrasjon ppm	Forklaring
350 - 400	Normalnivå i uteluft (varierer noko med årstida)
800	Prosentdel misnøgde stig raskare når denne verdien blir overskriden
1000	Anbefalt maksimum verdi jf. Veiledning 444
2000 - 3000	Lufta følest tung å jobbe i. Konsentrasjonen fell
5000	Maks verdi jf. Forskrift om Tiltaks- og grenseverdier
5000 - 10000	Ein føler seg trøytt
40000 - 50000	Svimmelheit, hovudpine, visuell- og hørselsdysfunksjon, og bevisstlausheit
70000 - 100000	Kan forårsake kveling i løpet av minutt

2.2.3 Tidlegare forskning på inneklima

Arbeidsprestasjonen til ein person som oppheld seg i dårleg inneklima kan bli redusert på grunn av høge CO₂-konsentrasjonar og temperaturar. Det finns mykje forskning på temaet inneklima og arbeidsprestasjon, men det er sett lite på om naturleg ventilasjon med låge temperaturar i korte periodar vil ha innverknad på arbeidsprestasjonen.

I ein feltstudie av Tanabe et al. (2015) gjennomført i eit kontorbygg i Japan vart det funne at ved aktiv kontroll av det termiske miljøet vart arbeidsprestasjonen betre. Undersøkinga vart utført i sommarhalvåret, og kjøletemperaturen var sett til 28 °C. Personar i kontoret kunne bruke personlege vifter og liknande, og det var ikkje noko spesifikk kleskode. Resultata frå studien viste at med mogelegheit for tilpassing av sine termiske omgivingar heva dette arbeidsprestasjonen.

Vidare har Satish (2014) vist at ved høgare CO₂-konsentrasjon vil evna til å ta avgjersler bli dårlegare. Det vart utført testar med CO₂-nivå på 600, 1000 og 2500 ppm, med forsøk gjennomført på seks grupper à fire personar per gruppe. Alle vart blindtesta i 2,5 timer for kvar av dei ulike konsentrasjonane i eit testkammer med stabilt 23 °C. Forskjellen mellom 600 og 1000 ppm var moderate, mens opp til 2500 ppm var det tydeleg forskjell på resultata. Generelt vart prestasjonane betre med lågare CO₂-konsentrasjon. Studien konkluderer med at det ikkje nødvendigvis vil vere økonomisk lønsamt å redusere ventilasjonen då dette kan gå ut over produktiviteten til personane i lokalet.

Liknande vart også vist av Wargocki et al. (2000) som gjennomførte ein studie om oppfatta luftkvalitet, symptom på SBS, *Sick Building Syndrome*, og produktivitet. Fem forsøksgrupper med seks kvinner i kvar gruppe utførte kontorarbeid i 4,6 timar i strekk. Kvar gruppe gjorde dette tre gonger med ulike ventilasjonsratar: 3, 10 og 20 l/s. Resultatet viste at den oppfatta luftkvaliteten og produktiviteten vart betre ved høgare ventilasjonsratar. Symptom på SBS vart redusert.

Milton et al. (2000) gjennomførte ein analyse av 1994 tilfelle av sjukefråvær fordelt på 40 yrkesbygg med totalt 115 soner med separat ventilering. Ventilasjonen vart vurdert mellom høg (24 l/s) og låg (12 m/s) rate. Det vart funne at ved låge ventilasjonsratar var det større sjanse for sjukefråvær blant dei tilsette. For arbeid i kontorlokale var det ein relativ risiko for korttids sjukefråvær på 1,53 % ved dårleg ventilasjon. Med betre ventilasjon var sannsynet redusert til 1,52 %.

Valančius og Jurelionis (2013) gjennomførte forsøk i testkammer på korleis temperaturendring ville påverke arbeidsprestasjonen til kontorarbeidarar. 78 personar gjekk gjennom ulike testar i eit simulert cellekontor med to arbeidsplassar der to og to personar vart testa samtidig. Testane varte i 1 time og 45 minutt. Testpersonane var delt i tre grupper der ei gruppe vart testa med temperaturauke frå 22 °C til 26°C, ei gruppe med stabil temperatur på 22 °C og siste gruppa med temperaturreduksjon frå 22 °C til 18 °C. I dei to gruppene med temperaturendring vart det endra med 0,1 °C i minuttet. Resultata viste at ved auke til 26 °C var det minimal endring i prestasjon, men ved senking av temperaturen vart prestasjonen forbetra med 5,4 %. I rapporten vert det påpeika at desse resultata ikkje samstemmer med anna forskning på området, og at grunnen til dette kunne vere at forsøket var gjennomført for kortare periodar enn andre forsøk.

Eit litteraturstudie av Brager og de Dear (1998) konkluderte med at det er stor forskjell på opplevd termisk komfort i naturleg ventilerte bygg samanlikna med mekanisk kjølte bygg. Studien fann at i naturleg ventilerte bygg vil brukaren vere meir tolerant og ha meir avslappa forhold til temperatursvingingar. Personar vil også føretrekkje at temperaturen inne står i stil til klimaet ute. I bygg med mekanisk kjøling vil derimot personar ha større krav til det termiske miljøet, og vere meir følsame for endringar i inneklimaet.

2.3 Matematiske modellar

I dette kapittelet vert ulike matematiske modellar for berekning av luftmengder presentert. Dei tre modellane er valde fordi dei tek utgangspunkt i vindhastigheit. Det eksisterer også modellar som er baserte på trykk- og temperaturforskjell, men desse er valt vekk på bakgrunn av tilgjengeleg informasjon. Modellane vert seinare i rapporten brukt til å vurdere om den berekna, teoretiske luftmengda kan tilfredsstillе krava til innemiljø i kontorbygg.

2.3.1 De Gids og Phaffs metode

Modellen gjer eit generelt uttrykk for ventilasjonsraten Q (m^3/s) gjennom eit ope vindaug som ein funksjon av temperaturforskjell, vindhastigheit og dei fluktuerande vilkåra. Effektiv hastigheit U_{eff} (m/s) er definert for straumen gjennom ei halv vindaugsopning. Likninga er vist i (2.9), og gjeld i tilfelle med ein-sidig ventilasjon (Allard et al., 1998, de Gids og Phaff, 1982). Eit uttrykk for luftmengda er vist i (2.10).

$$U_{\text{eff}} = \frac{Q}{A/2} = \sqrt{C_1 U_{\text{met}}^2 + C_2 H \Delta T + C_3} \quad (2.9)$$

$$Q = \frac{A}{2} \cdot \sqrt{C_1 U_{\text{met}}^2 + C_2 H \Delta T + C_3} \quad (2.10)$$

Q	Ventilasjonsrate [m^3/s]
A	Areal av vindaugsopning [m^2]
C_1	Koeffisient avhengig av vinden [-]
U_{met}	Meteorologisk vindhastigheit [m/s]
C_2	Koeffisient avhengig av oppdrift [-]
H	Vertikal storleik av opninga [m]
ΔT	Temperaturforskjell mellom ute og innetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
C_3	Turbulenskoeffisient [-]

Målingane som er bakgrunn for denne likninga er utført på tre ulike stader. Alle forsøka vart gjort i andre etasje i bygg lokalisert i urbant strøk. Studien kjem ikkje med nokon konklusjon på korleis val av vindaugstype kan påverke resultatet. For parametrane C_1 , C_2 og C_3 vart det funne fylgjande verdiar ut frå målingane: $C_1 = 0,001$, $C_2 = 0,0035$ og $C_3 = 0,01$ (de Gids og Phaff, 1982).

Uttrykket tek ikkje omsyn til luftmotstandskoeffisienten som vil vere ulik for ulike typar vindaug. Koeffisienten er inkludert i U_{eff} , og kan difor ikkje endrast etter kva type vindaug som er nytta. Sidan det tek utgangspunkt i eitt vindaug, vil lufta måtte både passere inn og ut i same lufteopninga, noko som gjer at arealet for tilført luft er halve arealet av vindaugsopninga (Larsen og Heiselberg, 2008).

2.3.2 Warrens metode

I tilfelle med ein-sidig ventilasjon gjennom vindauge med vind som drivkraft er Warrens metode ein forenkla modell for å berekne ventilasjonsraten Q (m^3/s). Modellen tar ikkje omsyn til temperaturforskjell, og tek utgangspunkt i referansehastigheit og hastigheita rett utanfor vindaugsopninga. Fyrste versjon av uttrykket vart presentert av Warren (1977) og var basert på målingar i ein fullskala bygning. Frå likninga (2.11) frå 1977 kan minimumsraten for ventilasjon på grunn av vind bereknast.

$$Q = 0,02 \cdot A \cdot U_T \quad (2.11)$$

A	Areal av opning [m^2]
U_T	Gjennomsnittshastigheit i fri vind i lik høgde som bygningen [m/s]

(2.12) og (2.13) viser vidareutviklinga av det originale uttrykket, som vart utarbeida på grunnlag av vindtunnel- og fullskalaforsøk. Likning (2.13) representerer ein minimumsverdi for ventilasjonsraten, og er basert på resultat for låge bygg. Høgare ventilasjonsratar kan difor førekome for andre kombinasjonar av vindauge, visse vindretningar og for høgare bygg (Warren og Parkins, 1985).

$$Q = 0,1 \cdot A \cdot U_L \quad (2.12)$$

U_L	Lokal vindhastigheit utanfor opninga [m/s]
-------	---

$$Q = 0,025 \cdot A \cdot U_R \quad (2.13)$$

U_R	Referansehastigheit målt ved standard høgde [m/s]
-------	--

2.3.3 Larsen og Heiselbergs metode

Basert på forsøk i vindtunnel utarbeida Larsen og Heiselberg (2008) eit nytt uttrykk for ein-sidig ventilasjon ved naturlege drivkrefter. I motsetnad til tidlegare metodar tek denne modellen omsyn til innfallsvinkel av vinden på vindauga. Tidlegare har termisk oppdrift og vindhastigheit blitt vekta likt. Dei to drivkreftene vert i denne modellen vekta etter kven som er mest dominerande til ei kvar tid. Likninga er vist i (2.14), henta frå Larsen og Heiselberg (2008)

$$Q_v = A \cdot \sqrt{C_1 \cdot f(\beta)^2 \cdot |C_p| \cdot U_{ref}^2 + C_2 \cdot \Delta T \cdot H + C_3 \cdot \frac{\Delta C_{p,opening} \cdot \Delta T}{U_{ref}^2}} \quad (2.14)$$

Q_v	Volumstrøm [m ³ /s]
A	Areal av opning [m ²]
C_1	Koeffisient avhengig av vinden [-]
$f(\beta)$	Funksjon av innfallsvinkel for vinden [°]
$ C_p $	Trykkkoeffisient
U_{ref}^2	Referansehastigheit [m/s]
C_2	Koeffisient avhengig av oppdrift [-]
ΔT	Temperaturforskjell mellom inne- og uteluft [°C]
H	Høgdeforskjell mellom topp og botn av opninga [m]
C_3	Turbulenskoeffisient [-]
$\Delta C_{p,opening}$	Største avvik mellom trykkkoeffisientane [-]

Konstantane C_1 , C_2 og C_3 er definert for tre ulike vindretningar, sjå Tabell 2.10. På bakgrunn av Larsen og Heiselberg (2008) forsøk i vindtunnel vart også verdiane delt opp etter innfallsvinkel då fylgjande vart påvist:

- Vindkreftene er mest dominerande på vindsida av bygget
- Oppdrift er mest dominerande på lesida av bygget
- Trykkforskjell forårsaka av vind er avhengig av innfallsvinkel

Tabell 2.10: Verdier for konstantane C_1 , C_2 og C_3 ved forskjellige vindretningar. Basert på Larsen og Heiselberg (2008).

Retning	Innfallsvinkel (β)	C_1	C_2	C_3
Vindside	$\beta = 285 - 360^\circ$, $\beta = 0 - 75^\circ$	0,0015	0,0009	-0,0005
Leside	$\beta = 105 - 255^\circ$	0,0050	0,0009	0,0160
Parallelle luftstrøm	$\beta = 90^\circ$, $\beta = 270^\circ$	0,0010	0,0005	0,0111

3. Referansebygg

Som det vart nemnt i innleiinga var det originalt planlagt å utføre målingar i eit nytt kontorbygg, kalla NINA-huset som ligg i Trondheim. Då dette ikkje var mogeleg blir difor bygget brukt som referansebygg i samanlikninga mellom «nytt bygg» og «eldre bygg». Det eldre bygget er Varmeteknisk laboratorium, som er bygningen der målingane vart gjennomført. I dette kapittelet vert relevant informasjon for begge bygga gitt, blant anna byggtekniske detaljar som vert nytta seinare i oppgåva.

3.1 NINA-huset

I 2008 lyste Norsk institutt for naturforskning (NINA) ut ein arkitektkonkurranse med bestilling av eit kontorbygg med fylgjande ynskje; "et markant og moderne bygg som arkitektonisk skil seg ut på en positiv måte, gjerne med referanse til NINAs egen kjernevirksomhet – naturforskning" (Norsk institutt for naturforskning, u.d.). Målet var eit nytt kontorbygg i Trondheim med fokus på høg miljøstandard og gode materialval. Bygget stod ferdig i 2013, og var det fyrste kontorbygget i massivtre i den størrelsen i Noreg. Bygningen (Figur 3.1) består i hovudsak som nemnt av massivtre, bortsett frå nedste etasje som er i plasstøypet betong. Bygget er prosjektert som passivhus etter passivhusstandarden (Straume, 2013, Norsk institutt for naturforskning, u.d.). For å hindre støy i kontorlandskapa er det montert støydempande materiale i tak slik som vist på Figur 3.2, mens Figur 3.3 viser ein typisk kontorplass i landskapet.



Figur 3.1: Sørfasade på NINA-huset. Brukt med samtykke frå driftsavdelinga ved NINA-huset.



Figur 3.2: Akustiske tiltak i himling, NINA-huset. Foto: Ragni Melstveit



Figur 3.3: Kontor plass i ope landskap i NINA-huset. Foto: Ragni Melstveit

3.1.1 Byggetekniske detaljar

Bygget er oppført i material som krev lite vedlikehald og det vart fokusert på godt innemiljø og dagslys under prosjektering. U-verdiar og anna informasjon er gitt i Tabell 3.1. Verdiane skal seinare brukast i simulering av naturleg ventilasjon i nytt bygg.

Tabell 3.1: Byggetekniske data for NINA-huset.
(Straume, 2013, Norske arkitekters landsforbund, u.d., Anda, 2015a)

Eigenskap	Verdi	Eining
Innvendig etasjehøgde	3,3	m
Kuldebruverdi	0,03 ⁵	W/mK
U-verdi tak	0,15	W/m K
U-verdi golv	0,07	W/m K
U-verdi dekker	0,347	W/m K
U-verdi vegg	0,14	W/m K
U-verdi vindaug	0,7	W/m K
Luftvekslingstal	0,3	h ⁻

⁵ Henta frå NS 3701

Ytterveggane er bygd opp med ein fasadekledning av Kebony, eit tremateriale som er spesielt tilpassa det nordiske klima og som ikkje har behov for vidare overflatebehandling etter montering. Det er brukt 400 mm isolasjon som bidreg til ein total U-verdi på 0,14 W/m²K for ytterveggane. Sør- og vestfasaden er prega av store vindaug, balkongar og halvklimaliserte rom som vist på Figur 3.1. For nord- og austfasaden er vindaugsarealet mindre for å hindre store varmetap. Det er ikkje oppgitt U-verdi for etasjeskilja, men det er oppgitt at dekkja er laga i 170 mm massivtreelement (Enova, u.d.). Utrekna U-verdi er vist i Tabell 3.2. Byggforsk (2009) oppgjer typisk densitet på massivtreelement til rundt 50 kg/m³ som vil svare til ei varmeleiingsevne på 0,14 W/mK.

Tabell 3.2: Berekning av U-verdi i dekker, NINA-huset.

Material	Dimensjon m	Varmeleiingsevne λ W/mK	Varmemotstand R m ² K/W
R_{si}	-	-	0,130
Golvbelegg	0,005	0,18	0,028
Massivtre	0,17	0,14	1,214
Isolasjon	0,05	0,034	1,471
R_{se}	-	-	0,040
ΣR_{tot}			2,883
U_{tot}			0,347 W/m²K

Alle vindauga er 3-lags med oppgitt U-verdi på 0,7 W/m²K. Fellestrekk for mange av vindauga er at dei består av eit stort glas som kan opnast manuelt, og ein separat vindaugsdel montert øvst som vert automatisk styrt etter vêrdata. Dei motoriserte vindauga er også mogeleg å styre ved hjelp av manuell brytar ved sidan av vindauga (Straume, 2013, Anda, 2015b).

3.1.2 Ventilasjon

Ventilasjonen på NINA-huset er i hovudsak styrt ut frå;

- Temperatursensorar
- Rørslesensorar
- CO₂-sensorar
- Vêrdata

Bygget har installert VAV-ventilasjon, men det er lagt til rette for naturleg kryssventilasjon for å redusere energibruken i bygget. Ventilasjonen i møteromma er regulert etter temperatur og luftkvalitet (CO₂). Ein tilstadeværelsesdetektor styrer ventilasjonen i møteromma slik at ventilasjonen vert skrudd av når rommet er tomt eller til minimums luftmengd når CO₂-konsentrasjonen eller temperaturen er for høg utan at møterommet er i bruk. For kontorlandskapa vert ventilasjonen styrt ut ifrå personar til stade. Temperaturregulering i landskapa går ut frå temperatur i rommet og radiatorane vert regulert for å oppretthalde konstant romtemperatur. Viss temperaturen i ein etasje overstig 26 °C vil dei motoriserte vindauga opnast. Lufting med automatiserte vindauge vert stogga viss det er dårlege forhold for vind, hastigheit eller frostfare ut frå byggets vêrstasjon (COWI, 2011).

3.2 Varmeteknisk laboratorium

Då det gamle laboratoriet brann ned i 1957, vart det behov for nytt bygg til dei varmetekniske studia. Prosjektering starta i 1958, og i 1962 vart det nye laboratoriebygget teke i bruk (Strinda historielag, 2016, NTNU Eiendomsforvaltning, 2010). Bygningen, vist på Figur 3.4, består av fleire laboratorium og to større kontorfløyar. Det er cellekontor i alle etasjar for tilsette, og det finns grupperom og lesesalar, Figur 3.5, i høvesvis 1. og 4. etasje til studentar.



Figur 3.4: Varmeteknisk laboratorium. Foto: Ragni Melstveit



Figur 3.5: Lesesal i Varmeteknisk med plass til 57 studentar. Foto: Ragni Melstveit

3.2.1 Byggtekniske detaljar

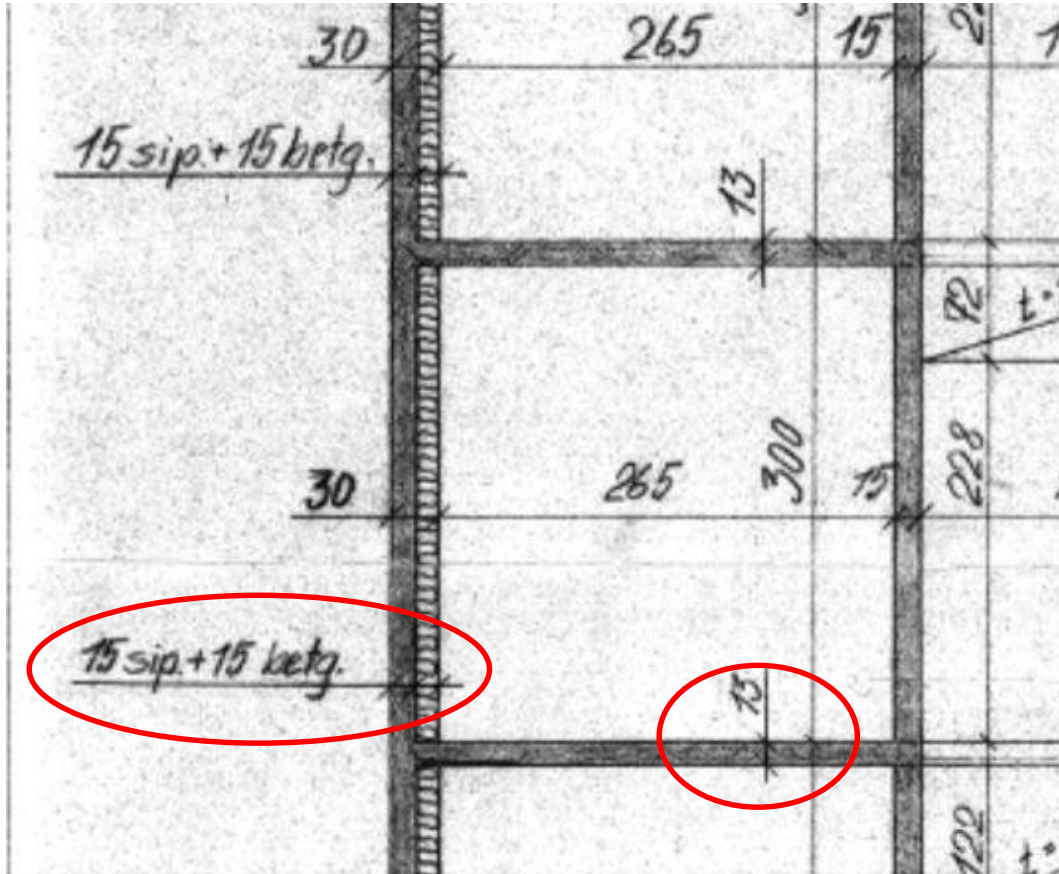
Det har ikkje vore mogeleg å oppdrive spesifikke byggtekniske detaljar for Varmeteknisk. Erfaringstal, gamle forskrifter og tilgjengeleg informasjon frå NTNU Eiendomsforvaltning vart difor nytta for å finne realistiske verdiar. Ein oversikt over dei antekne verdiane for Varmetekniske er gitt i Tabell 3.3. Grunnlaget for val av verdiane er presentert under. U-verdiane vert seinare nytta som verdiar for «eldre bygg» til simulering i IDA ICE.

Tabell 3.3: Samandrag av byggtekniske detaljar for Varmeteknisk

Bygningsdel	Verdi	Eining
Innvendig etasjehøgde	3,0	m
Kuldebruverdi	0,08	W/mK
U-verdi tak	3,6	W/m K
U-verdi golv	3,6	W/m K
U-verdi yttervegg	0,83	W/m K
U-verdi vindauge	1,5	W/m K
Lekkasjetal	5,5	h^{-1}

Yttervegg

Då det ikkje var tilgjengelege detaljteikningar av veggkonstruksjonen vart det teke utgangspunkt i ein snitteikning av bygget. Eit utsnitt av snitteikninga er vist i Figur 3.6 og viser bruk av 150 mm siporex (lettbetong) og 150 mm betong. U-verdien er utrekna i Tabell 3.4 til 0,83 W/m²K. Det vart lagt til 10 mm sementpuss på utsida, og ikkje teke omsyn til eventuell behandling av vegg innvendig.



Figur 3.6: Utklipp frå snitteikning 2-706 for Varmeteknisk..
Brukt med samtykke frå NTNU Drift.

I fylgje rapporten til Bøhn et al. (2006) er typiske U-verdiar for bygg frå 1955 med 100 mm armert betong rundt 0,96 W/m²K. Frå byggeforskriftene frå 1949 og 1969 er U-verdien høvesvis 1,05 og 0,81 W/m²K for mur- og betongbygg lokalisert i Trondheim (Kommunal- og arbeidsdepartementet, 1949, Kommunal- og arbeidsdepartementet, 1969). På bakgrunn av dette vert den utrekna varmegjennomgangskoeffisienten sett på som ei god tilnærming for den gjeldande veggkonstruksjonen.

Tabell 3.4: Berekning av U-verdi for yttervegg, Varmeteknisk.
Verdi for varmeleiingsevne for materiala er henta frå Petersson (2004).

Material	Dimensjon m	Varmeleiingsevne λ W/mK	Varmemotstand R m ² K/W
R _{se}	-	-	0,040
Sementpuss	0,01	1,2	0,008
Betong	0,15	1,7	0,088
Lettbetong	0,15	0,16	0,938
R _{si}	-	-	0,130
ΣR_{tot}			1,204
U _{tot}			0,8305 W/m²K

Dekker

Val av U-verdi for dekker vart basert på Figur 3.6, som viser at dekket er 130 mm tjukt. Det vart antekke at dekket er av betong, med total U-verdi inkludert golvbelegg på 3,6 W/m²K, berekna i Tabell 3.5. Med tanke på at bygget vart bygd grunna brann er det sannsynleg at materialval og liknande var prega av billege løysingar. Betong kan difor sjåast på som eit reelt val. Det er likevel mogeleg at dekket består av til dømes lettbetong som vil ha betre varmeleiingsevne enn betong og gje betre U-verdi. Det er retta usikkerheit til valet av materiale.

Tabell 3.5: Berekning av U-verdi for dekker i Varmeteknisk.
Verdiar for varmeleiingsevne til betong er henta frå Petersson (2004).

Material	Dimensjon d m	Varmeleiingsevne λ W/mK	Varmemotstand R m ² K/W
R _{se}	-	-	0,040
Betong	0,13	1,7	0,076
Golvbelegg	0,005	0,18	0,028
R _{si}	-	-	0,130
ΣR_{tot}			0,274
U _{tot}			3,646 W/m²K

Vindaug

Alle vindauga i kontorfløyane vart skifta ut i 2007. U-verdi for glaset i vindauga er 1,1 W/m²K, og for heile vindaugskonstruksjonen 1,5 W/m²K. Informasjonen er gitt av Svein Jarle Haukland, tilsett i NorDan (epost 27. april).

Kuldebruverdi

Normalisert kuldebruverdi vart sett til 0,08 W/mK for bygget. Talet er henta frå Dalaker (2009) og valt ut frå kriteria om universitetsbygg i mur frå 1960. Det er ikkje teke omsyn til utskifting av vindauge i 2007, sjølv om dette påverkar den totale kuldebruverdien.

Lekkasjetal

Lekkasjetalet n_{50} er sett til 5,5 h⁻¹ for bygget, basert på Dalaker (2009). Det vert anteke ein middels tett konstruksjon for bygningar bygd i perioden 1961-1975.

4. Metode for målingar

I dette kapitlet vert det gått gjennom forsøka som skal gjerast. Aktuelt måleutstyr vert presentert med fokus på avvik og korrigerings av utstyr. Det er gjort risikoanalyse for forsøket og framgangsmåte for målingane er forklart.

4.1 Førebuingar

På grunn av forseinkingar av utstyr til måleriggen, vart det ikkje mogeleg å utføre målingane på NINA-huset slik som det opphavelig var planlagt. Målingane vart difor utført på Varmeteknisk laboratorium på Gløshaugen i ein av studentlesesalane der. Lesesalen er 185 m², og har plass til 57 studentar.

4.1.1 Risikovurdering

Før forsøket starta vart det utført ein risikoanalyse. Følgjande risikoar vart funne:

- Fall ved montering av utstyr i høgda
 - Sannsyn: Svært liten.
 - Konsekvens: Personskade.
 - Tiltak: Vise generell varsamheit, planlegge montering på førehand. Bruke stabilt utstyr tilpassa arbeidet.

- Fallande objekt ved montering av utstyr i høgda
 - Sannsyn: Liten
 - Konsekvens: Skade på utstyr, personskade.
 - Tiltak: Vise generell varsamheit, planlegge montering på førehand. Avgrense arbeidsområde for andre personar.

- Feil og skade på måleriggen
 - Sannsyn: Svært liten.
 - Konsekvens: Personskade (elektriske støyt og liknande).
 - Tiltak: Målerigg blir satt opp av labteknikarar. Ved mistanke om feil på utstyr skal utstyr slås av og labteknikar kontakta.

4.2 Målefeil

Vanlegvis vil ein gå ut frå at alle målingar har målefeil og usikkerheit. I fylgje Novakovic et al. (2007) kan målefeil delast i tre hovudkategoriar: Grove feil, systematiske feil og tilfeldige feil.

- Grove feil, U_G :
Feil av denne typen kan vere avlesingsfeil, ombyting av tal, feil plassering av komma og liknande. Desse feila skuldast ofte manglande oppmerksomheit eller slurv.
- Systematiske feil, U_S :
Denne typen feil kan skuldast hysteresse og friksjon i måleinstrumentet, ukalibrerte instrument, feil utføring av måling eller feil funksjonssamanheng. Systematisk feil kan både skuldast måleinstrumentet i seg sjølv og operatøren av instrumentet. Under kartlegging av systematiske feil skil ein difor mellom instrumentfeil og metodefeil.
- Tilfeldige feil, U_T :
Under denne kategorien fell feil som dårleg oppløysing på analoge eller digitale instrument, utilfredsstillande måledynamikk eller ekstern, usystematisk påverking. Tilfeldige feil kan ikkje eliminerast, berre reduserast.

Grove feil og metodefeil må reduserast til eit minimum, sidan desse vil påverke alle målingane. Når slike feil er redusert vil gjentekne målingar gje resultat som ligg omkring den sanne verdien (Novakovic et al., 2007).

4.3 Måleutstyr

På førehand vart det utført kalibrering av CO₂-målarane og hastigheitsmålarane. På grunn av avgrensa tid til målingar vart det ikkje føreteke kalibrering av temperatursensorane før etter målingane var ferdige. Den fyrste kalibreringa av hastigheitsmålarane var ikkje utført på korrekt måte, og desse vart kalibrerte på nytt i etterkant av forsøket.

4.3.1 Måling av lufthastigheit

Hastigheita vart målt av tre probar av typen 8465 og sju av typen 8475. Desse var montert på eit vertikalt stativ, i høgdene vist i Tabell 4.1. Måledata vart logga via sensorar til pc ved hjelp av programmet LabView. Tidskonstanten vart sett til 4 sekund, der den logga verdien er gjennomsnittet av 20 avlesingar per tidskonstant (TSI Incorporated, 2013).

Tabell 4.1: Oversikt over monteringshøgder for hastigheitsmålarar.

Målepunkt	Probetype	Høgde [m]	Kommentar
Punkt 1	8475	0,1	Ankelhøgde
Punkt 2	8475	0,3	
Punkt 3	8475	0,6	
Punkt 4	8475	0,9	
Punkt 5	8475	1,1	Hovudhøgde (sitjande). Der ikkje anna er spesifisert er det denne høgda det refererast til vidare i oppgåva.
Punkt 6	8475	1,3	
Punkt 7	8465	1,6	Hovudhøgde (ståande)
Punkt 8	8465	1,9	
Punkt 9	8465	2,25	Ikkje brukt
Punkt 10	8475	2,3	

Måleutstyret har eit visst avvik, som bør takast med i vurdering av måleresultata. Nøyaktigheita på probane er presentert i Tabell 4.2, og viser at det er noko skilnad på dei to probetypane. Sidan det vart forventa at det kunne oppstå høge hastigheitar i forsøket vart fullskala hastigheit sett til 2,5 m/s, som vil seie den høgaste hastigheita utstyret kunne måle. Totalt avvik per måling vart berekna frå formel (4.1). Utrekna maksimalt avvik, sjå Tabell 4.3, for probe 8465 var $\pm 0,0652$ m/s og $\pm 0,1$ m/s for probe 8475. Avviket vert ikkje teke med i vidare behandling av måledata, og det vert tillagt resultata ein ekstra usikkerheit på grunn av dette.

Tabell 4.2: Spesifikasjonar for hastigheitsmålarane. Henta frå TSI Incorporated (2013)

Eigenskap	Probe 8465	Probe 8475
Nøyaktigheit	$\pm 2,0$ % av måling $\pm 0,5$ % av vald fullskala	$\pm 3,0$ % av måling $\pm 1,0$ % av vald fullskala
Responstid for luftstraum	0,2 sek	5 sek
Fullskala måleområde	0 – 2,5 m/s	0 – 2,5 m/s

$$A_{total} = (V_{måling} \cdot A_{måling}) + (V_{FS} \cdot A_{FS}) \quad (4.1)$$

A_{total}	Totalt avvik [m/s]
$V_{måling}$	Målt hastighet [m/s]
$A_{måling}$	Avvik av måling [%]
V_{FS}	Fullskala hastighet [m/s]
A_{FS}	Avvik av fullskala hastighet [%]

Tabell 4.3: Berekning av maksimalt avvik for hastighetsmålingar.

Probe	Målt hastighet m/s	Avvik i måling %	Fullskala hastighet m/s	Avvik fullskala hastighet %	Utrekna maksimalt avvik m/s
8465	2,5	± 2,00 %	2,5	± 0,50 %	± 0,0625
8476	2,5	± 3,00 %	2,5	± 1,00 %	± 0,1

Korrigerings av hastighetsmålarane funne ut frå tre målingar utført ved hjelp av "vindtrummel", gjennomført 8. april og 29. april. Kwart målepunkt vart korrigert opp mot referanseverdiane frå vindtrummelen, der hastigheita vart fastsett ut frå luftinntak og turtal. Dette er for å korrigere avviket mellom målt lufthastighet og referansehastighet. Sjå Vedlegg B for meir informasjon om korrigeringa. Dei brukte korrigeringsfaktorane finst i Tabell 4.4.

Tabell 4.4: Faktorar brukt for å korrigere målte hastigheitar

Punkt	Korrigeringsfaktor
Punkt 1	0,882
Punkt 2	1,049
Punkt 3	1,700
Punkt 4	1,100
Punkt 5	1,137
Punkt 6	1,030
Punkt 7	1,130
Punkt 8	1,350
Punkt 10	1,354

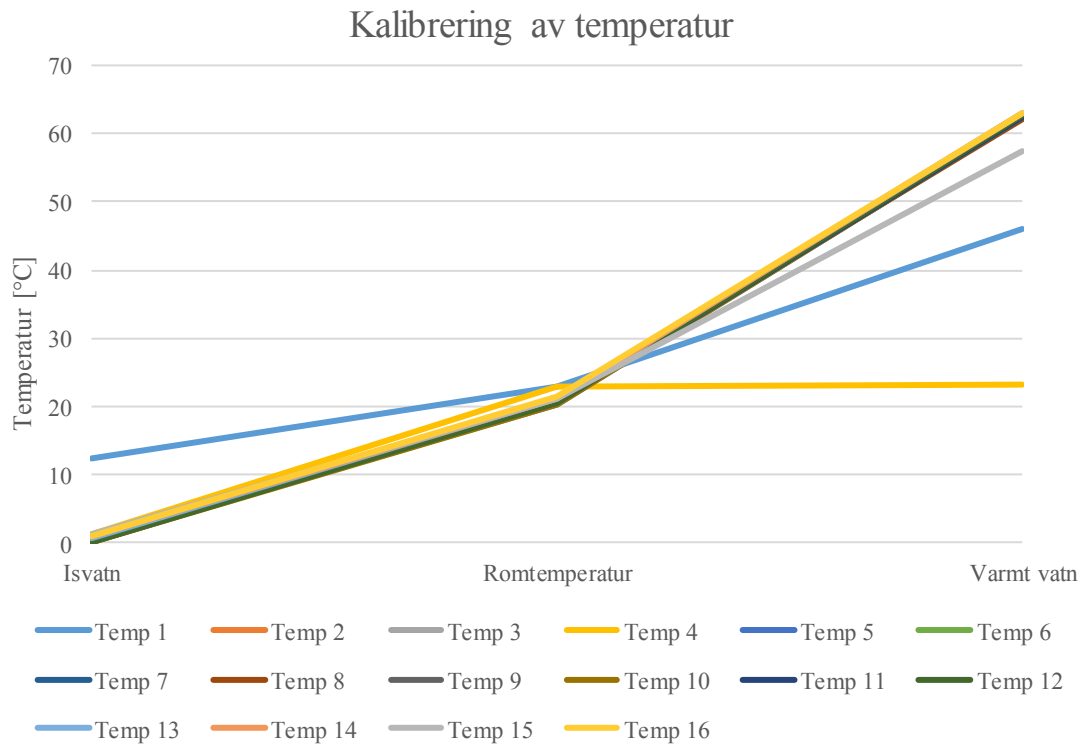
4.3.2 Temperaturmålingar

Det vart totalt brukt 16 termoelement for måling av temperatur. Ti av desse var montert på same rigg som hastigheitsmålarane og dei resterande seks vart hengd opp frå taket i faste høgder. Sjå oversikt i Tabell 4.5 nedanfor.

Tabell 4.5: Monteringshøgder for termoelement.

Målepunkt	Høgde [m]	Kommentar
Temperatur 1	0,1	Ikkje brukt
Temperatur 2	0,3	
Temperatur 3	0,6	
Temperatur 4	0,9	Ikkje brukt
Temperatur 5	1,1	Hovudhøgde (sitjande). Der ikkje anna er spesifisert er det denne høgda det refererast til vidare i oppgåva.
Temperatur 6	1,3	
Temperatur 7	1,6	Hovudhøgde (ståande person)
Temperatur 8	1,9	
Temperatur 9	2,25	
Temperatur 10	2,3	
Temperatur 11	0,1	Ankelhøgde. Fast plassering 1 meter frå vindauga
Temperatur 12	1,1	Hovudhøgde. Fast plassering 1 meter frå vindauga
Temperatur 13	0,1	Ankelhøgde. Fast plassering 2 meter frå vindauga
Temperatur 14	1,1	Hovudhøgde. Fast plassering 2 meter frå vindauga
Temperatur 15	0,1	Ankelhøgde. Fast plassering 3 meter frå vindauga
Temperatur 16	1,1	Hovudhøgde. Fast plassering 2 meter frå vindauga

Termoelementa vart berre sjekka i romtemperatur før forsøket starta. Alle viste då tilnærma lik temperatur, og sidan det var avgrensa tid til målingar, vart det ikkje testa meir før etter målingane var ferdige. 8. april vart alle termoelementa testa i isvatn, romtemperatur og varmt vatn. Resultata for to av elementa var dårlege for kulde og varme, som det tydeleg viser i Figur 4.1. Tal frå termoelement nummer 1 (blå linje) og 4 (gul linje) er difor ikkje brukt vidare i oppgåva. Nummer 15 (grå linje) viser eit lite avvik på rundt 5 °C ved høge temperaturar. Avviket vart sett på som lite betydeleg for desse målingane, sidan dette forsøket ikkje forventa å oppnå så høge temperaturar. Nummer 15 vart difor teke med i vidare berekningar, utan korrigering.



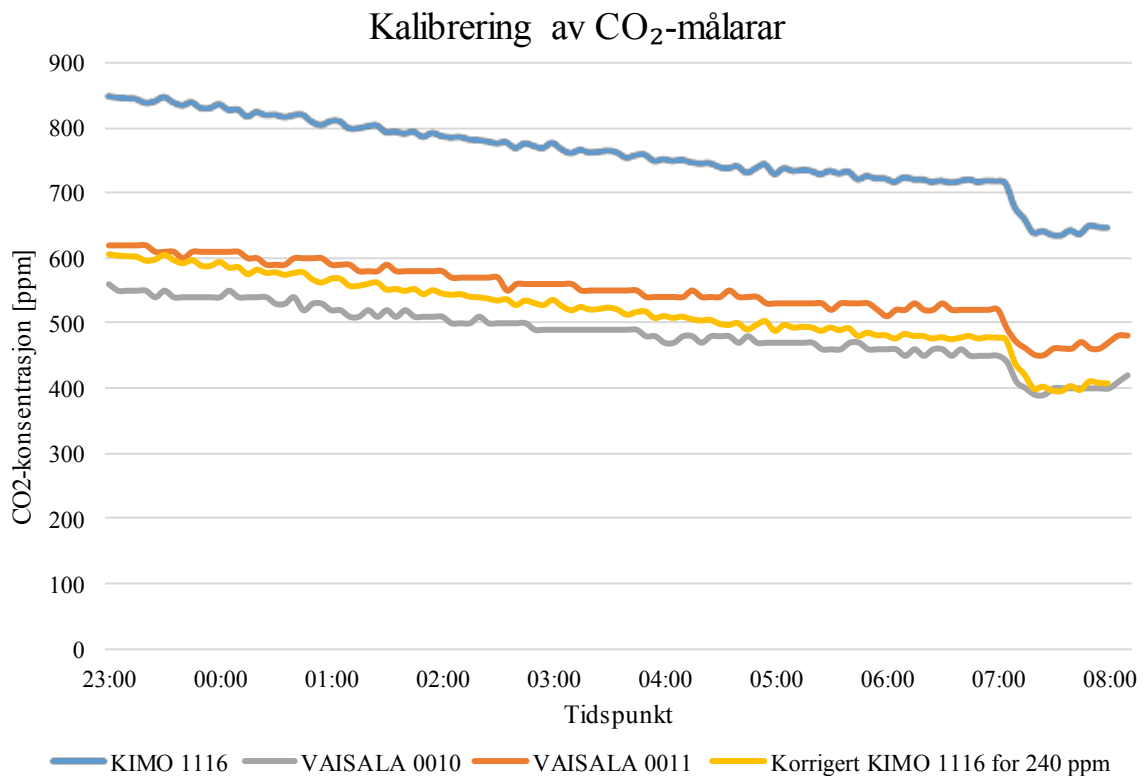
Figur 4.1: Resultat frå kalibrering av termoelement i isvatn, romtemperatur og varmt vatn.

4.3.3 CO₂-målingar

Til CO₂-målingane vart det nytta ein KIMO AQ 200 og to VAISALA M170 med GM70 probar. Kalibrering av desse vart utført ved å gjere ei måling i eit tomt rom over natta 7. mars. Resultata er vist i Figur 4.2, der KIMO 1116 viser unormalt høge verdiar. Denne målarer vart difor korrigert med 240 ppm, som vart berekna ut frå gjennomsnittet av dei to andre instrumenta. Som grafen i Figur 4.2 viser vil dei korrigererte verdiane liggje nærare forventa CO₂-nivå. For KIMO og VAISALA er eigenskapane til probane oppgitt i Tabell 4.6. Instrumentet frå KIMO oppgjer nøyaktigheit for heile utstyret under eitt, medan informasjonen for VAISALA er gitt for indikator og probe kvar for seg.

Tabell 4.6: Eigenskapar til CO₂-målarane (Vaisala, 2001, KIMO Instruments, u.d.)

Eigenskap	MI70 – indikator VAISALA	GMP222 – probe VAISALA	KIMO AQ 200
Nøyaktigheit	0.2 % av fullskala	< ± [20 ppm CO ₂ + 2 % av måling]	± 3 % av måling eller ± 50 ppm
Måleområde	-	0 - 3000 ppm	0 - 5000 ppm



Figur 4.2: Kalibrering av CO₂-målarar.

4.3.4 Personar til stades

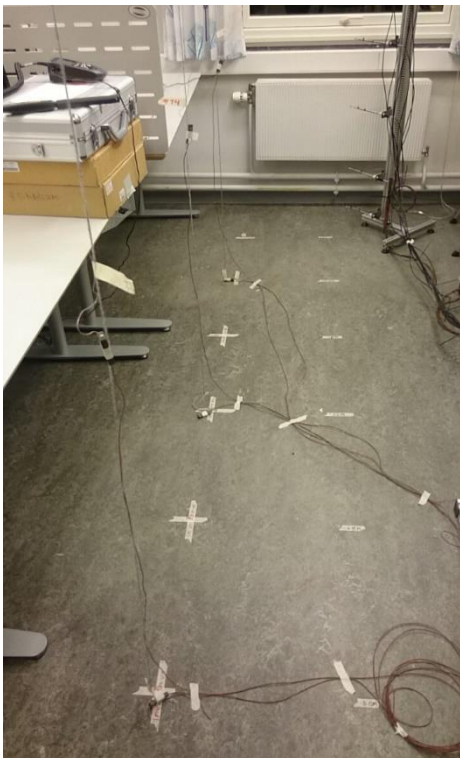
Under målingane vart det dokumentert kor mange personar som var til stades under forsøka. Sidan målingane vart gjennomført på kveld og natt, vart det berre i ein avgrensa periode det var naudsynt å loggføre personar til stades. I dei aktuelle tidsromma vart det tald personar kvart tiande minutt. I desse periodane vart rommet sett på som folketomt, fordi forureining frå ein person vil ha minimalt betyding for dei store luftmengdene som er i rommet.

4.4 Utføring

Feltmålingane var utført i perioden 16.-19.mars. For nøyaktige å få resultat var det avgjerande at den mekaniske ventilasjonen i rommet var skrudd av under målingane. Driftstida vart difor redusert til 08.00 - 16.00 dei aktuelle dagane, og målingane vart utført i tidsrommet 17.00 - 06.00.

4.4.1 Hastigheit og temperatur

Som beskrive i kapittel 0 vart måleutstyr for hastigheit og temperatur montert på eit vertikalt stativ som kunne flyttast rundt. Plassering av lause termoelement og oppmerking for måling er vist på bilete i Figur 4.3 og Figur 4.4. Sjølv vindaugeopninga er vist i Figur 4.5. Måleområdet rundt vindauge 4 er avgrensa av kontorpultar på kvar side slik som det er teikna på Figur 4.6.



Figur 4.3: Oppsett og merking for lengder. Til venstre heng trådane med termoelement ned frå taket.



Figur 4.4: Måleutstyret i bruk. Her vart det gjennomført ei måling tre meter inn i rommet. Skapet til høgre i biletet innehaldt loggeutstyr.



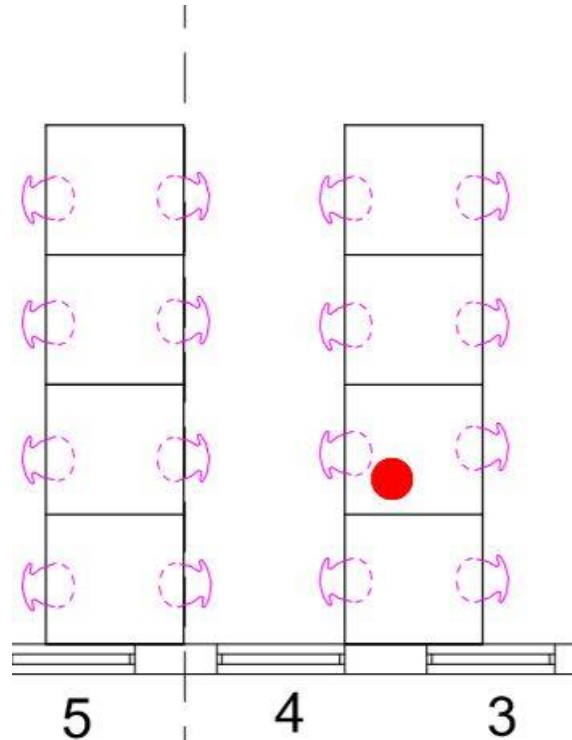
Figur 4.5: Vindaug nummer 4 med opningsareal rundt 0,62 m².

For å kunne måle lengre ut langs veggen blei nabovindauga, nummer tre, brukt for å få lengre avstand til måleutstyret. Ved målingane 1,5 meter og 2,5 meter frå måleutstyret var det ei rekkje med kontorpultar som stod i vegen når vindaug nummer tre vart brukt. Dette er vist i Figur 4.7 der luftstraumane må passere kontorpultane før dei rekk bort til måleutstyret som er plassert innover frå vindaug nummer 4. For målingar 0,0 og 0,5 meter langs veggen utgjør kontorpultane ikkje noko feilkjelde – sjå Figur 4.8.

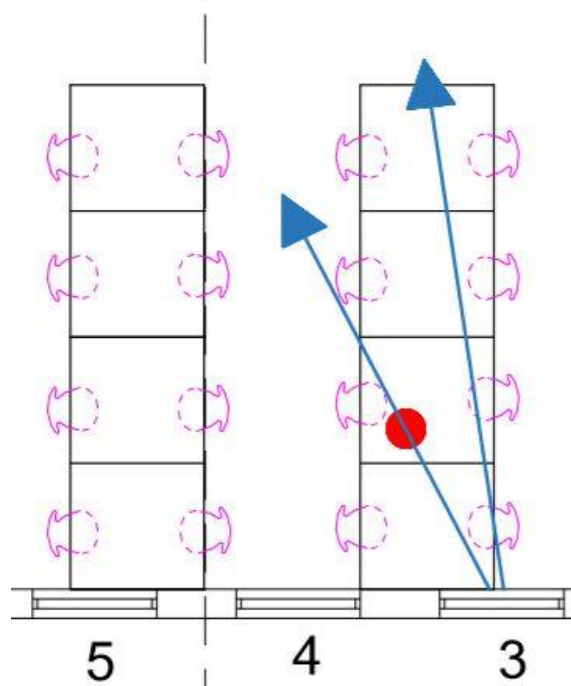
Forsøka for sjokklufting kan delast i to kategoriar; med og utan radiator. Dette vart utført på fire ulike lengder langs veggen, slik at resultatane totalt sett dekkar eit stort område av arealet rundt vindauga. Det vart lufta i totalt seks minutt under kvar måling, og vart gjenteke tre gonger med 24 minutt lukka vindaug mellom kvar lufting. Stabil innetemperatur vart oppnådd før neste lufting vart gjort. Under kvar sjokklufting vart riggen flytta framgangsmåten for forsøka, der eitt forsøk tok totalt 1,5 time.

Under måling vart riggen alltid flytta i stigande rekkefylgje frå 0,5 til 3,0 meter. Ideelt sett burde dette vore gjennomført i tilfeldig rekkefylgje, og er ei feilkjelde som vert vidare kommentert i diskusjonen. Forsøka med og utan radiator, samt forsøk med ulike avstand langs veggen, vart utført i tilfeldig rekkefylgje. Radiator var alltid kjølig før forsøk utan oppvarming starta.

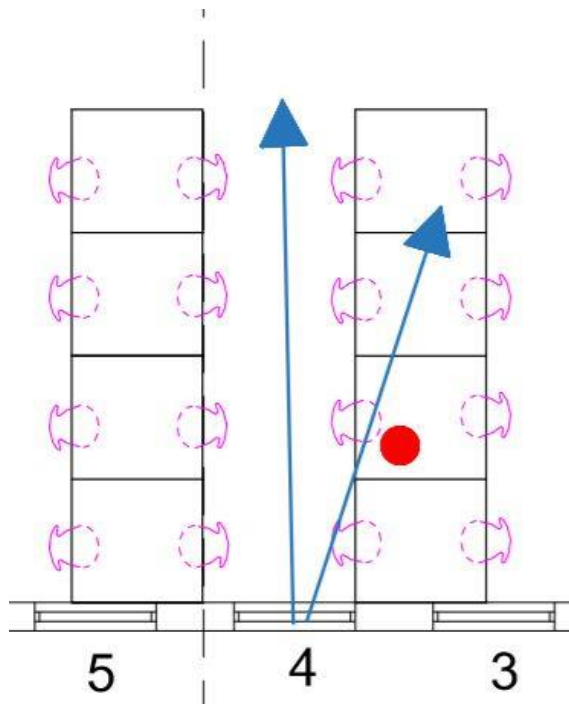
For sjokklufting var opninga på vindauga rundt 40 cm under alle målingane. Det vil tilseie eit totalt opningsareal på 0,62 m², medrekna glipene som oppstår på sida av vindauga. Størrelsen på opninga vart valt på bakgrunn av å oppnå stort luftskifte på lita tid. Det vart ikkje testa for andre opningsstørrelsar.



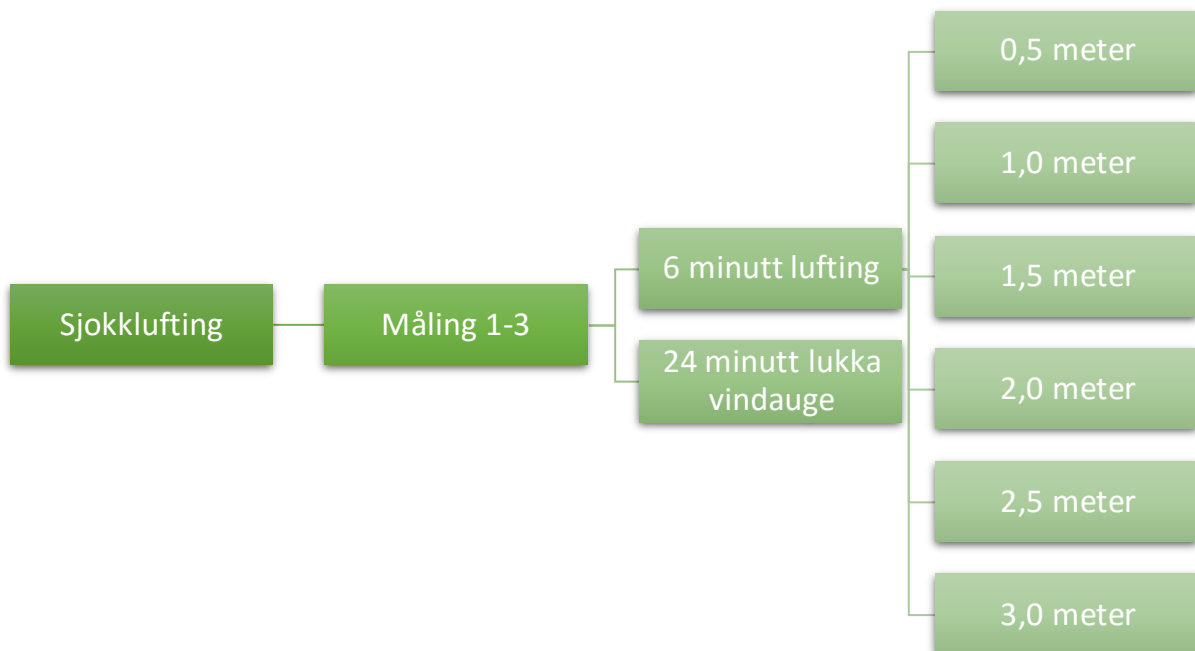
Figur 4.6: Måleområdet med møblering, raudt merke viser plassering av CO₂-målar. Vindaug 3 og 4 vart nytta til sjokklufting.



Figur 4.7: Grafisk framstilling av målingar 1,5 og 2,5 meter langs veggen. Sjokklufting gjennom vindaug 3. For desse målingane vart kontorpultane ei feilkjelde.



Figur 4.8: Grafisk framstilling av målingar 0,0 og 0,5 meter langs vegg. Sjokklufting gjennom vindaug 4.



Figur 4.9: Framstilling av rekkefylgje og tidsbruk for forsøk med sjokklufting. Totalt tidsforbruk for eit forsøk var 1,5 time.

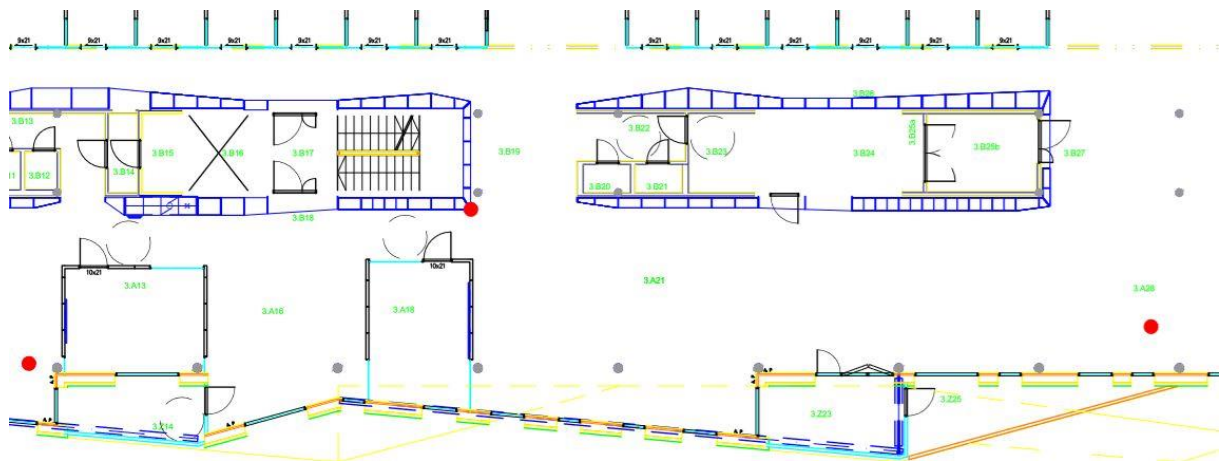
4.4.2 CO₂-måling

Forsøket vart gjennomført i veka før påske, og det var difor generelt få personar på lesesalen sjølv på dagtid. Dette gjorde det problematisk å gjennomføre forsøk med tanke på CO₂-belastning i rommet. Dette blei undersøkt nærare ved hjelp av simulering i IDA ICE, sjå kapittel 0.

For å kunne samanlikne tettleiken og luftutsifting utan ventilasjon i bygga, vart det gjennomført lengre målingar av CO₂ i både NINA-huset og Varmeteknisk.

4.4.2.1 NINA-huset

Tre CO₂-målarar vart plassert ut i kontorlandskapet i 3.etasje. Plassering av probane er vist som raude merker i Figur 4.10, der alle stod 1,1 meter over golvet. To av målarane var plassert nær vindauga. Det var ikkje ideelt sidan brukarane hadde moglegheit til å opne vindauga og lufta nær fasade, då lufta kan vere betre enn i resten av rommet. Valet om å likevel plassere dei slik, vart teken på det grunnlag av at det var ubrukte kontorpultar i nærleiken, slik at probane ikkje vart påverka av personar i umiddelbar nærleik. Siste målar vart montert i ei hylle langs trappekjernen i bygget.



Figur 4.10: Plassering av CO₂-målarar ved måling i NINA-huset.

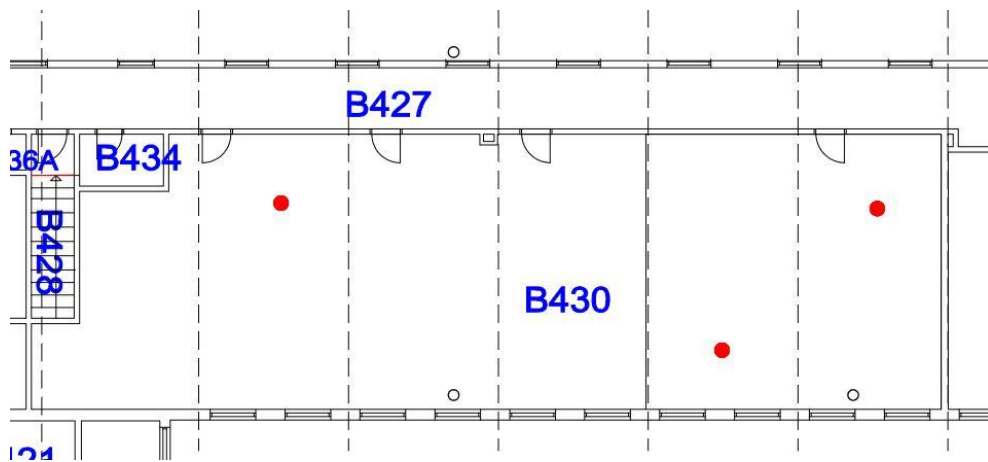
Alle målarane var montert 1,1 meter over golvet. Brukt med samtykke frå Pir II arkitekter.

Målinga vart gjennomført frå 5.-8. april, med logging kvart 15 minutt. Dei fyrste dagane var driftstida på ventilasjonen frå 06.00-19.00. Siste dag vart ventilasjonen skrudd av kl. 15.00, slik at CO₂-nivået steig på kveldstid. Målet var å sjå korleis CO₂-konsentrasjonen sank på grunn av luftskifte gjennom bygningskroppen. Resultatet vert presentert i kapittel 5.3.1. Det vart ikkje registrert kor mange personar som har vore til stades under målinga, men vert antekje folketomt i tidsrommet mellom 18.00 – 07.00.

4.4.2.2 Varmeteknisk

CO₂-nivået i lesesalen på Varmeteknisk vart registrert i perioden 11.-16. mars i forkant av det planlagde forsøket. Det vart logga kvar natt, med pausar i logginga på dagtid. Loggeintervallet var kvar 15.minutt. Plassering av instrumenta er vist med raude punkt i Figur 4.11. Alle probane var montert 1,1 meter over golvet. I måleområdet var det plassert ein målar oppå ein kontorpult. Denne pulten var det ikkje mogeleg å sitje ved når forsøket vart utført. Dei to andre vart teipa opp på greinstavar for elforsyning frå tak. Greinstavane var plassert mellom fire kontorpultar, noko som gjorde at ingen personar sat nære nok til å påverke målingane.

Under målingane vart det ikkje registrert personbelastning i rommet, men det vert anteke folketomt i tidsrommet mellom 20.00 – 07.00.



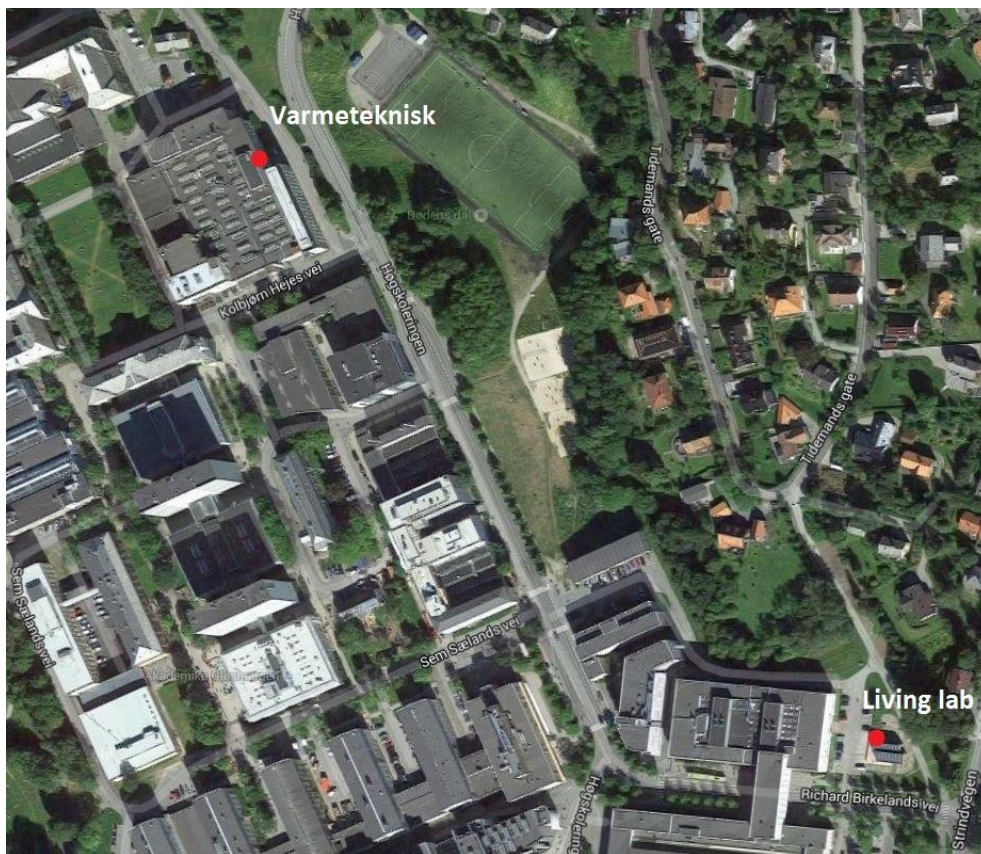
Figur 4.11: Plassering av CO₂-målarar under forsøka på Varmeteknisk. Alle instrumenta var montert 1,1 meter over golvet.

5. Resultat frå målingar

I fylgjande kapittel vert resultatata frå målingane presentert. Fyrst vert det ein kort gjennomgang av vêrdata, deretter fylgjer resultatata av temperatur- og hastigheitsmålingane. Resultata vert kort kommentert, og vidare diskusjon rundt feilkjelder og funn er gjort i kapittel 9.

5.1 Vêrdata

Alle vêrdata vart henta frå vêrstasjonen på Living Lab, som er den næraste målestasjonen til Varmeteknisk. Sjå kart over området i Figur 5.1. Det vart føreteke ein analyse av korleis vindhastigheit påverka resultatata for hastigheita inne på lesesalen i Varmeteknisk. For tre tilfeldige tidspunkt vart hastigheita inne i rommet samanlikna med utehastigheit, og temperaturen vart vurdert for alle døgn i måleperioden. Analysen er lagt i Vedlegg C. Frå analysen vart det ikkje funne noko tydeleg samanheng mellom hastigheita målt ved Living Lab og hastigheita målt inne på lesesalen. Før analysen vart det forventa å finne like kurver for dei to hastigheitene med tanke på at lufthastigheita inne burde fylgje vindhastigheita ute.



Figur 5.1: Plassering av vêrstasjon på Living Lab. Bilete henta frå Google Maps (2016).

Ved nærare analyse vart det oppdaga at Living Lab har svært fluktuerande vindretning. Sidan målestasjonen er plassert på taket på Living Lab, vil det få med seg alle endringar i vindretning. Det same gjeld ikkje for rommet målingane vart utført på Varmeteknisk, sidan det ligg med vindaug i nordaustleg retning. Høgdeforskjellen frå Living Lab til 4.etasje i Varmeteknisk, kan også vere ein grunn til skilnaden i hastigheit. Dei vanlegaste vindretningane vart difor funne frå målestasjon frå Voll i Trondheim, og vindrosa for normalperioden er vist i Figur 5.2. Seinare i rapporten vert normal vindretning brukt vidare, i staden for målte vindretningar på Living Lab.

Ei hindring for nærare analyse av vêrdata, var at SD-anlegget og logginga på Living Lab i periodar sluttar å logge. Det vart oppdaga fleire korte periodar på opptil ein time i strekk utan vêrdata. Frå 19. mars klokka 07.30 til 21. mars klokka 08.15, har SD-anlegget ikkje logga, noko som fører til at alle målingane utført kveld og natt 19. mars, ikkje kan samanliknast med uteforholda.

Temperaturdata viste at utetemperaturen låg mellom 0,5 og 5,5 °C under målingane. Likt som for hastigheit, mangla det registrerte data for siste døgeret i måleperioden. Ideelt sett burde alle målingane vore sortert etter utetemperatur, slik at det vart mogeleg å sjå kor mykje utetemperaturen påverkar målingane inne. Sidan det manglar loggedata for ein fjerdedel av målingane, vart det bestemt å ikkje sortere målte data på bakgrunn av utetemperatur.

Vindrose, frekvensfordeling av vind

Vindretning delt inn i sektorar på 30°

Frekvensfordeling av vindfart i prosent %

Vindfart (m/s)

- > 20.2
- 15.2-20.2
- 10.2-15.1
- 5.1-10.1
- 0.1-5

Stille (%)

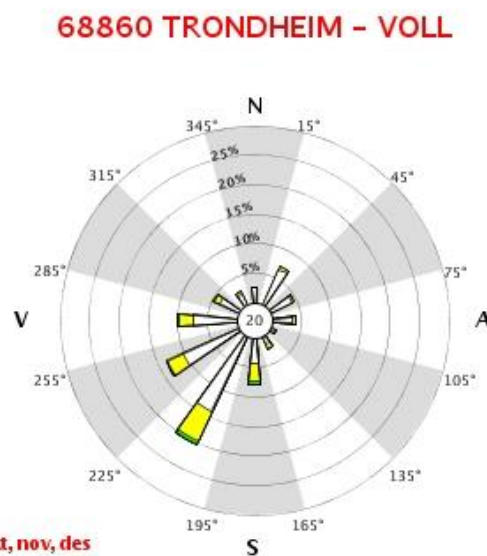
20



År: 1961 - 1990

jan, feb, mar, apr, mai, jun, jul, aug, sep, okt, nov, des

Tidspunkt: 7, 13, 19 (NMT)



Figur 5.2: Vindrose for normalperioden 1961-1990. Rundt 15 % av all vind gjennom året bles i retning sør-sørvest, med hastigheit mellom 0,1 – 5 m/s. Illustrasjon er generert via eklima.no.

5.2 Sjøkklufting

Etter at sjøve målingane for sjøkklufting var gjennomført, var det naudsynt med nærare analyse av resultata. Nødvendig rådata vart sortert ut, slik at det vart mogeleg å framstille funna grafisk. Kwart punkt i figurane er funne frå gjennomsnittsverdien av alle målingane utført i det aktuelle punktet. Alle behandla bakgrunnsdata er levert inn som digitalt vedlegg.

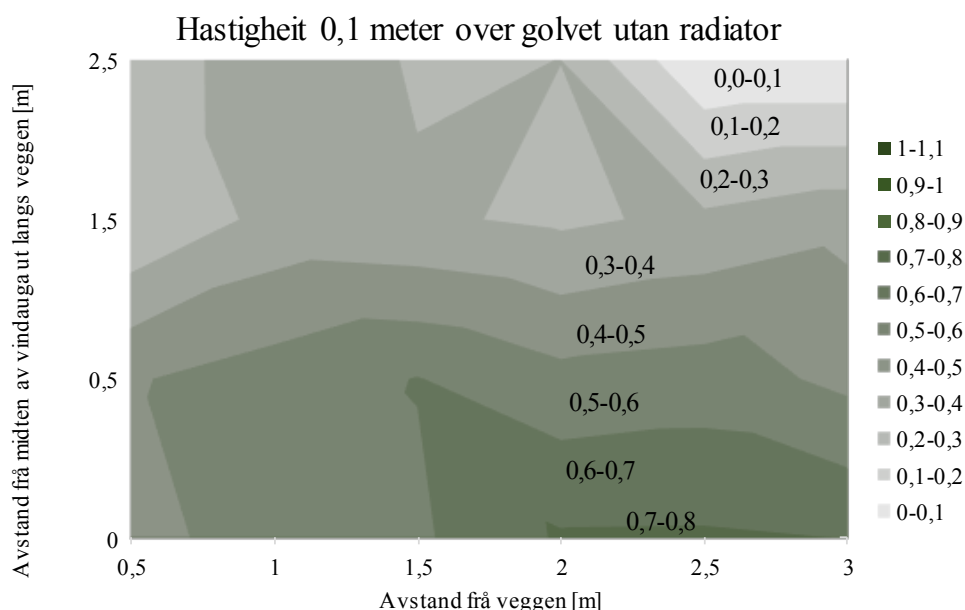
Resultata som er presentert er delt inn etter hastigheit og temperatur. For begge tilfella er det sortert etter horisontale og vertikale tverrsnitt av rommet, altså plan og snitt. Plana som er illustrert, gjeld enten for ankelhøgde (0,1 meter) eller hovudhøgde (1,1 meter) over golvet. Dei presenterte snitta er enten for rett innover i rommet, eller frå karmen av vindauga. Radiatoren har vore stilt på nivå 3 av 5 under målingane. Det er uvisst kva effekt radiatoren kan levere.

5.2.1 Hastigheit

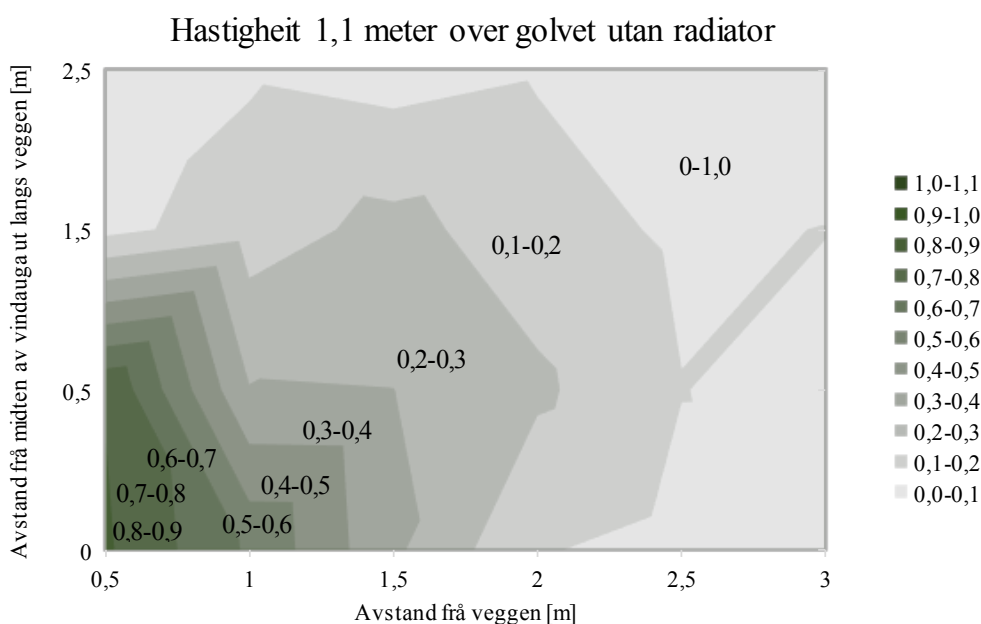
Alle resultat for hastigheit i dette kapitlet er kalibrerte verdiar. Resultata blir samanlikna med krav frå NS-EN ISO 7730, som vart presentert i Tabell 2.6. Lågaste anbefalte hastigheit i kontorlandskap på vinterstid er 0,21 m/s. Dette tilsvara kategori C, og under 15 % misnøgde. NS-EN ISO 7730 anbefaler at det er under 10 % misnøgde i eit lokale, noko som tilsvara kategori B og under 0,16 m/s på vinterstid.

Hastighet i plan

Figur 5.3 og Figur 5.4 gjeld begge for måling utan radiator, høvesvis for 0,1 meter og 1,1 meter over golvet. Med tanke på at det ikkje er anbefalt høgare hastigheitar enn maksimalt 0,21 m/s for vinterforhold, er det svært høge hastigheitar i rommet. I ankelhøgde vil det opplevast trekk i nesten heile området – det er berre lengst vekk frå vindauga at det ikkje er risiko for trekk. I hovudhøgde derimot, er det ikkje trekk 2 meter inn i rommet. Det viktigaste å leggje merke til her, er at lufta vil ha høg hastighet inn frå vindaugsopninga ein meter over golvet, for deretter å senke nedover til lufta treff golvet rundt halvannen meter inn i rommet. Ut frå desse to figurane er det tydeleg at krava til termisk komfort ikkje vert tilfredsstilt, og personar i rommet vil føle trekk ved ankelhøgde langt innover i rommet.

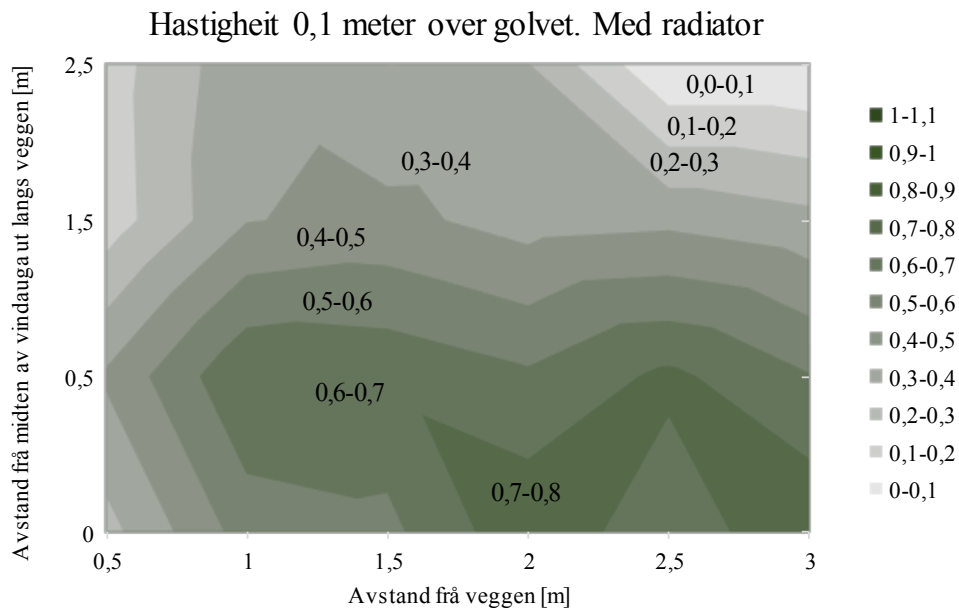


Figur 5.3: Hastighet i ankelhøgde. Forsøket vart gjort utan oppvarming. Hastigheitar opp mot 0,8 m/s.

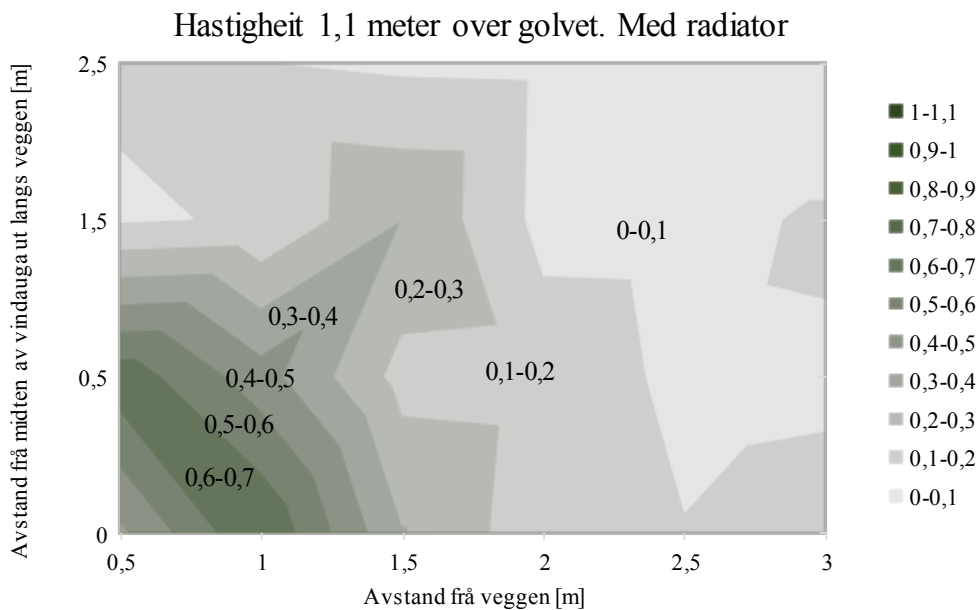


Figur 5.4: Hastighet i hovudhøgde. Målinga vart gjort utan oppvarming. Frå to meter og innover i rommet er krava til kategori C tilfredsstilt.

Hastigheitar i rom med radiator ståande på under vindauga, er gitt i Figur 5.5 og Figur 5.6. Også for forsøket med oppvarming er det høge hastigheitar langs golvet. Krava til hastigheit i kontorlandskap er ikkje tilfredsstilt i store delar av området ved ankelhøgde. For hovudhøgde vil hastigheita vere innanfor krava 2 meter vekk frå vindauga. Det vil opplevast trekk i området, sjølv med radiator på.



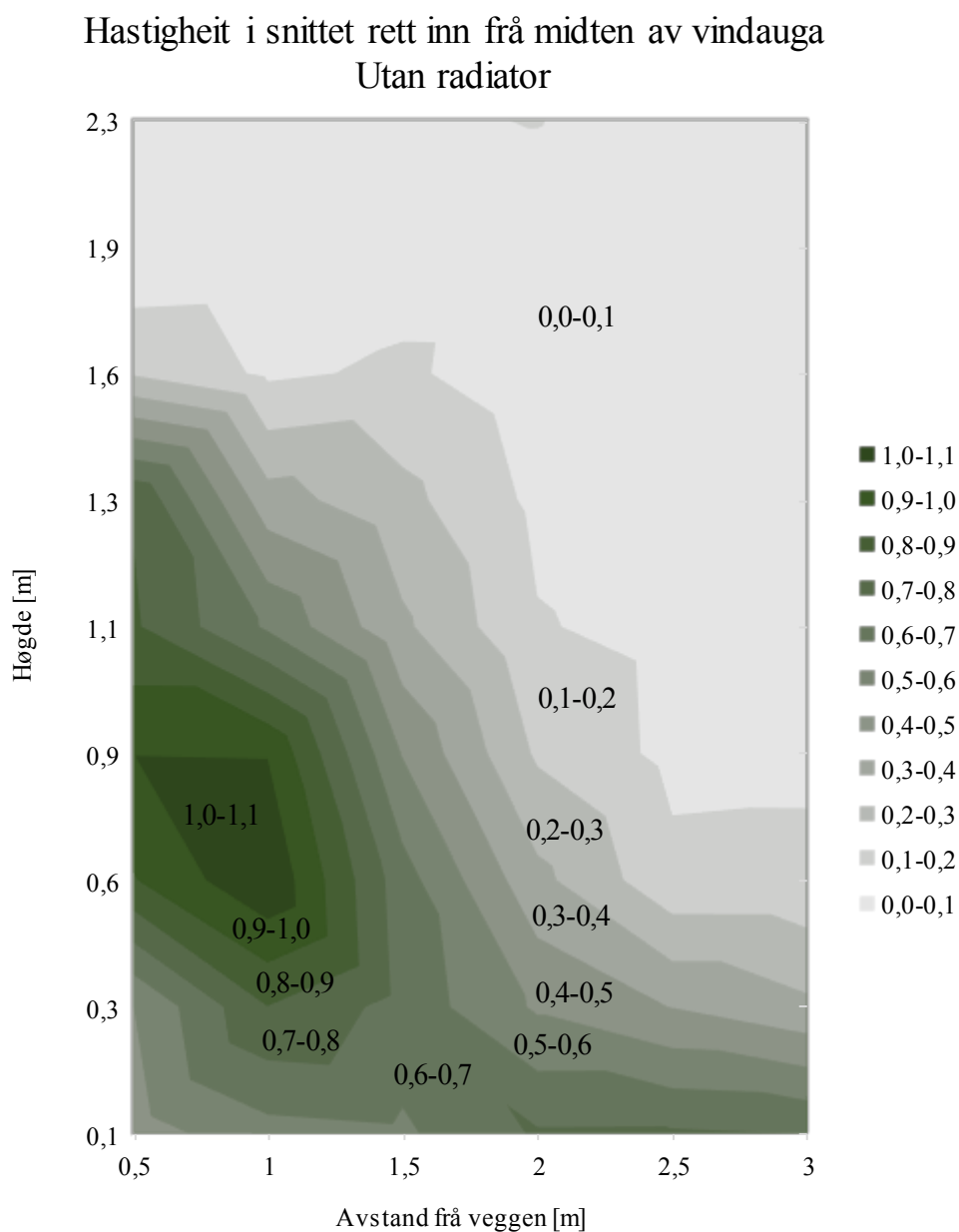
Figur 5.5: Hastigheit i, ankelhøgde. Gjennomført med oppvarming. Det vart målt høge hastigheitar i store delar av rommet.



Figur 5.6: Hastigheit i hovudhøgde. Forsøket vart gjort med oppvarming. Krava er tilfredsstilt frå to meter og innover i rommet.

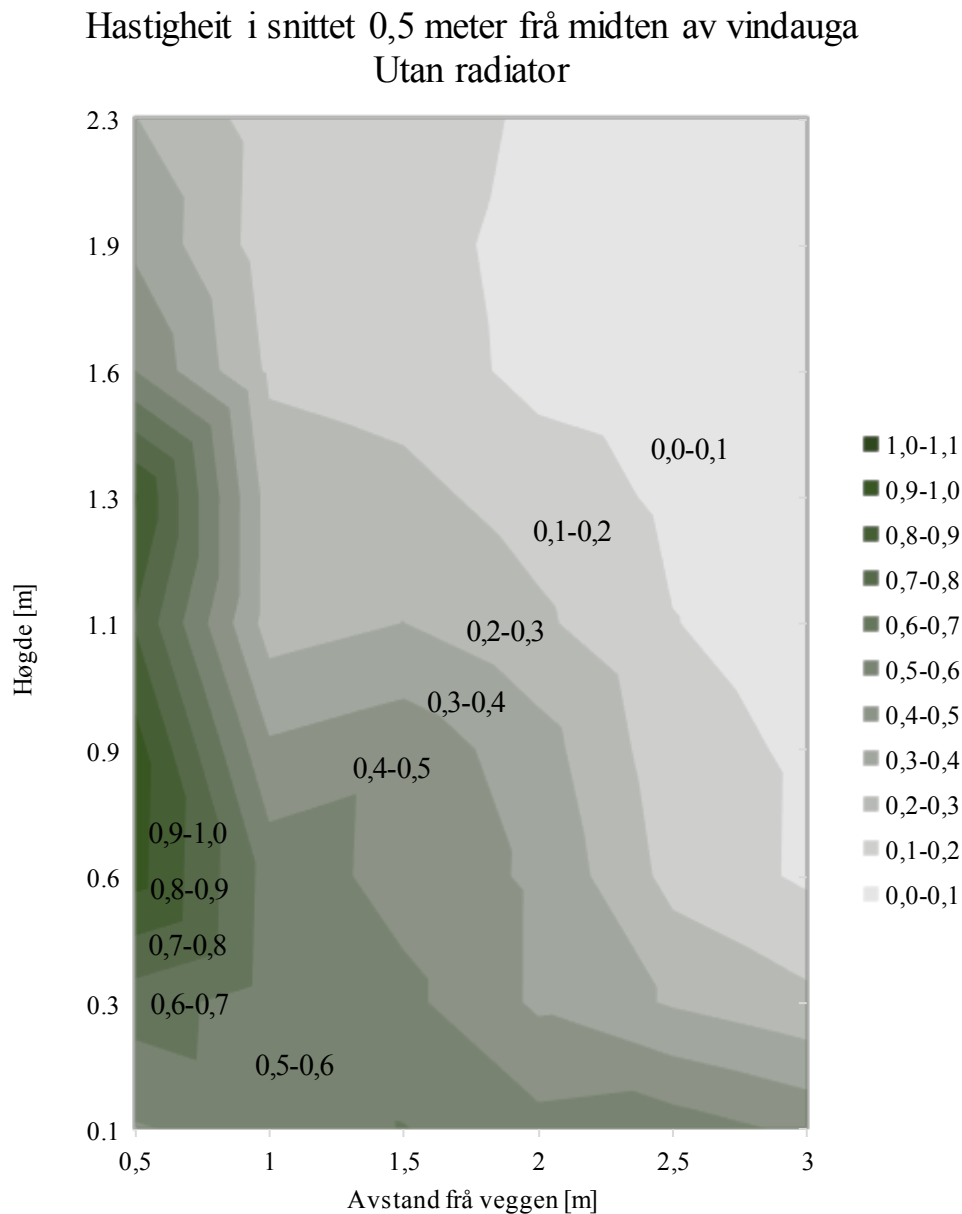
Hastighet i snitt

Ved samanlikning av luftrørsle i snitt i rommet, er det tydeleg at det er trekk langs golvet. I Figur 5.7 er det vist snitt frå midten av vindauga. Det oppstår ein luftstraum med høg hastighet rett innanfor opninga. Hastigheita minkar noko ned mot golvet, men er fortsatt svært høg i forhold til krava for termisk komfort. Over 1,6 meter vil det oppfattast få luftbevegelsar.



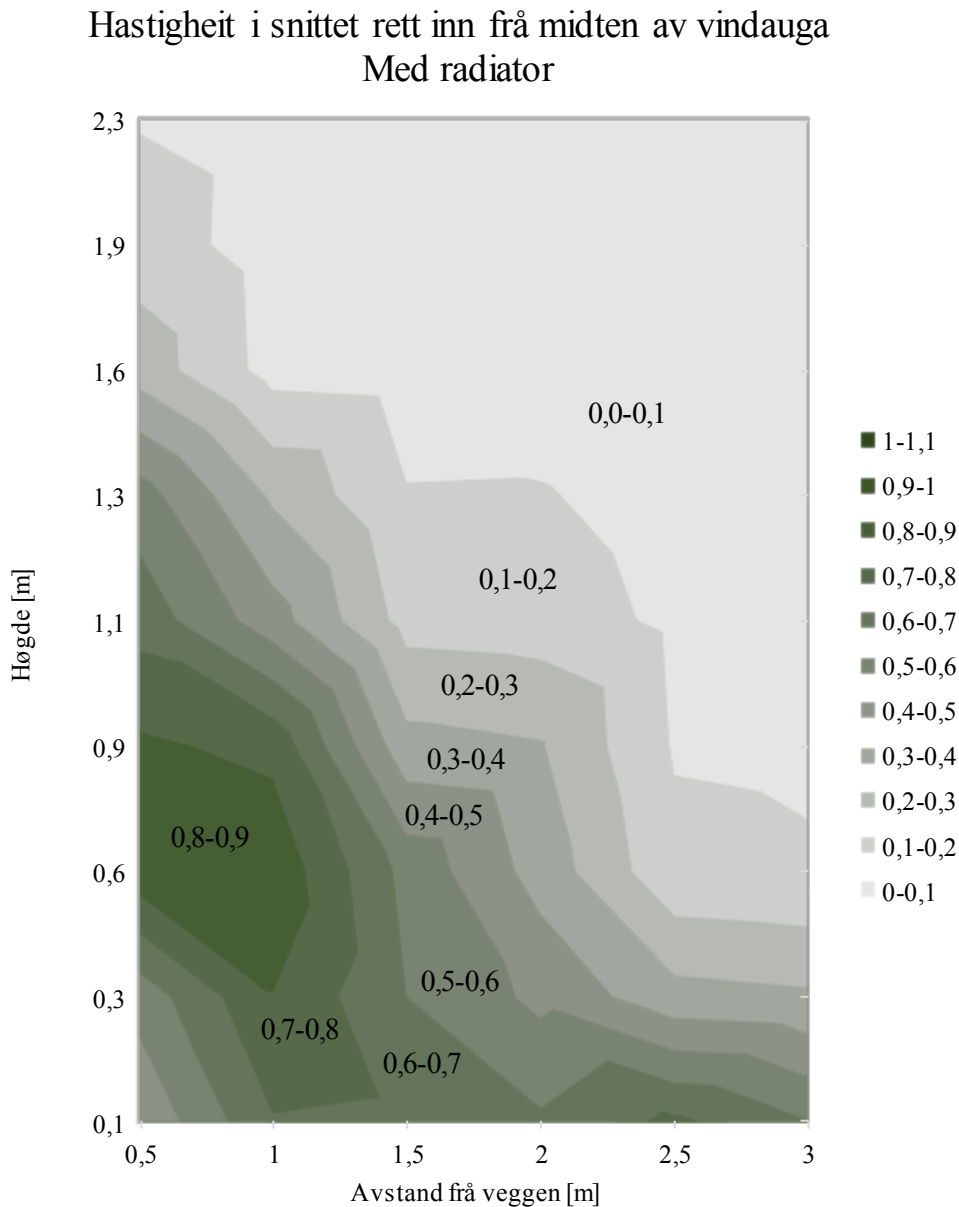
Figur 5.7: Hastighet i snittet rett inn i rommet. Målinga vart gjort utan oppvarming. Det vart målt opptil 0,7 m/s langs golvet i heile målerområdet.

Figur 5.8 viser hastighet i snittet frå kanten av vindauga. Det kan observerast lågare hastigheiter langs golvet samanlikna med snitt midt på vindauga, og det er heller ikkje like stor lufttrørsle innover i rommet. Langs kanten på vindauga er det høge hastigheiter, noko som kan kome av turbulens danna i kontakt med karmen. Ei interessant sak er at ved høgde 2,3 meter er det målt hastigheit opp mot 0,3 m/s. Denne luftstraumen finns berre på snitta langs vindaugskarmen, og er ikkje å sjå på snitt midt i vindauga. Det vert antekke at luftstraumen er turbulens danna mellom glipa øvst i det opne vindauga og vindaugskarmen.



Figur 5.8: Hastigheit i snitt frå kanten av vindauga. Målinga vart gjort utan oppvarming. Hastigheitar opp mot 0,6 m/s er observert langs golvet.

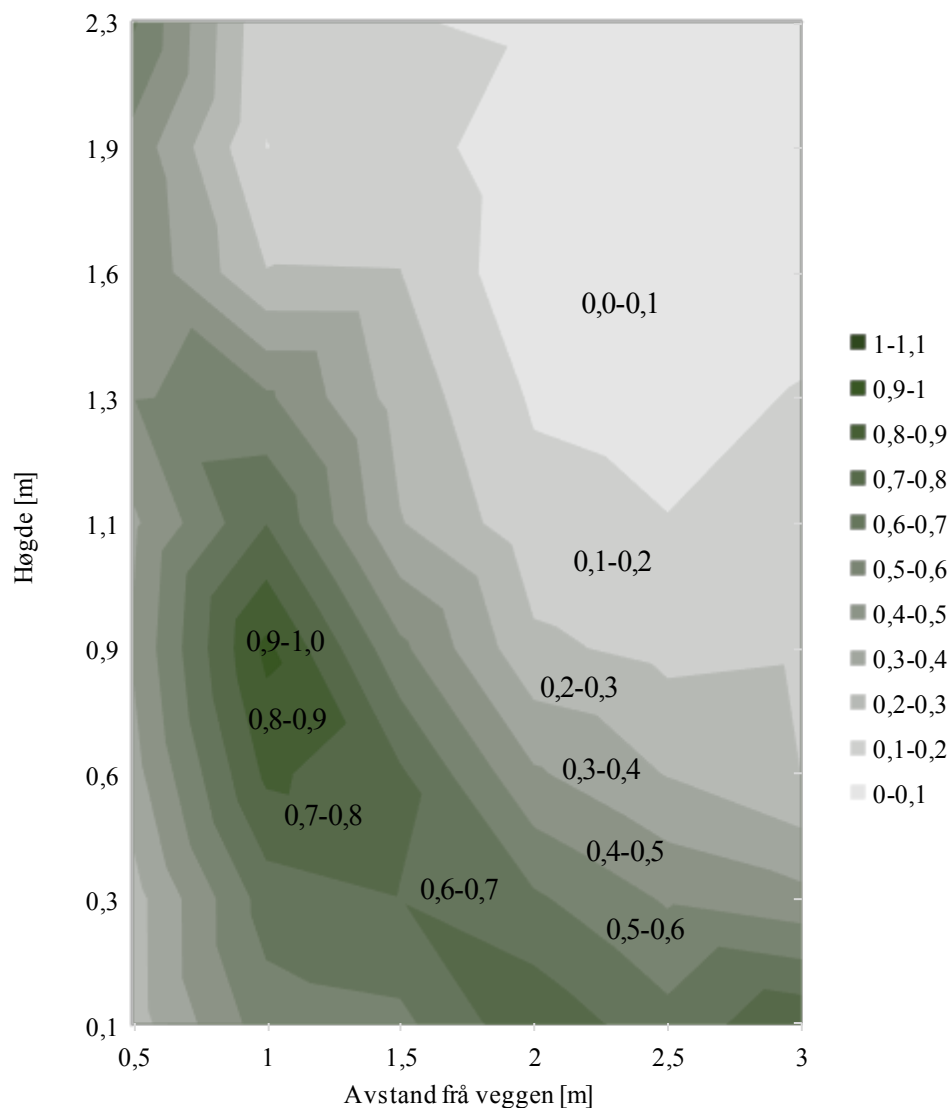
På Figur 5.9, som er snitt frå midten av vindauga med oppvarming, er lufthastigheita redusert samanlikna med Figur 5.7 utan oppvarming. Sjølv hastigheitsprofilen er lik for begge figurane, og sjølv om hastigheita rett innanfor vindauga er redusert, er den like stor innover i rommet. Det interessante er difor at radiatoren minkar luftstraumane innanfor vindauga på grunn av stigande varm luft, men har ikkje vore stilt på høg nok effekt til å påverke hastigheita innover i rommet.



Figur 5.9: Hastigheit i snittet rett inn i rommet. Forsøket vart gjort med oppvarming. Registrert hastigheiar opp mot 0,7 m/s langs golvet.

Figur 5.10 er eit snitt i rommet ved kanten av vindauga, basert på målingar med oppvarming i rommet. Samanlikna med snittet frå midten av vindauga er lufthastigheita inne rett innanfor vindauga redusert. Derimot kan det sjå ut som hastigheita langs golvet er større ved kanten av vindauga. Same som for snitt utan radiator, er det også her målt luftstrøm ved høgda 2,3 meter. Som nemnt tidlegare kjem dette av turbulens i punktet mellom det opne vindauga og hjørne på vindaugskarmen.

Hastigheit i snittet 0,5 meter frå midten av vindauga Med radiator



Figur 5.10: Hastigheit i snitt i rommet frå kant av vindauga. Forsøket vart gjort med oppvarming. Det vart målt hastigheitar opp mot 0,7 m/s langs golvet.

5.2.2 Temperatur

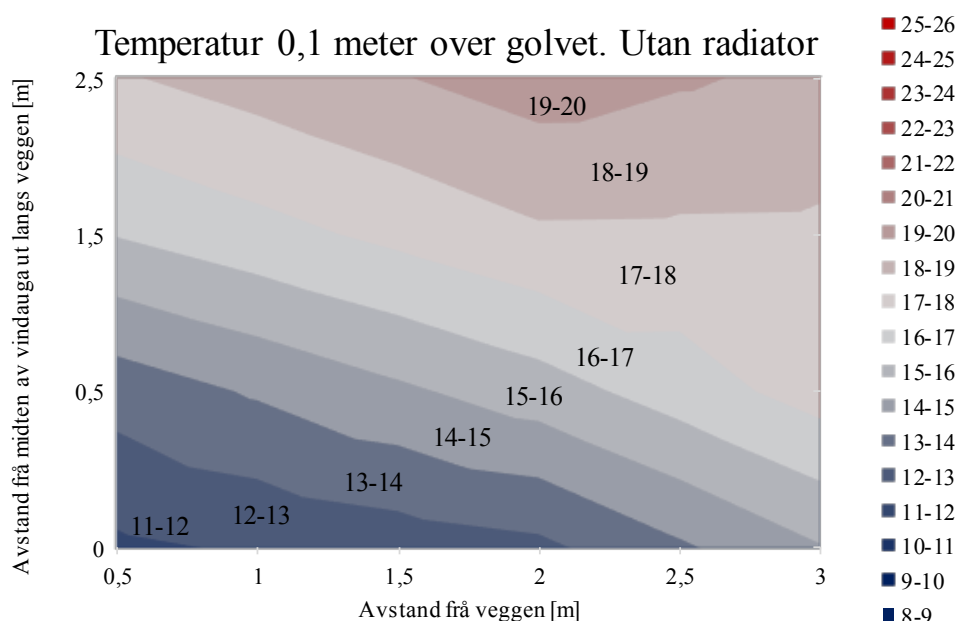
For alle temperaturar målt i 0,1 meters høgde er det teke utgangspunkt i verdiane for termoelementa som hang på 1, 2 og 3 meters avstand frå veggen. Verdiar for kvar halvmetar er funne ved interpolasjon mellom dei målte verdiane.

Det vart ikkje rekna om frå målt temperatur til operativ temperatur. Som det kjem fram frå likning (2.9) er operativ temperatur ein vekta verdi av middelstrålingstemperatur og tørrkuletemperatur. På grunn av størrelsen på rommet vart det antekt at dei omliggjande flatane vil ha svært liten innverknad. Målt temperatur vart sett på som dominerande i forhold til strålingstemperatur, og operativ temperatur vart vurdert som tilnærma lik dei målte temperaturane i rommet.

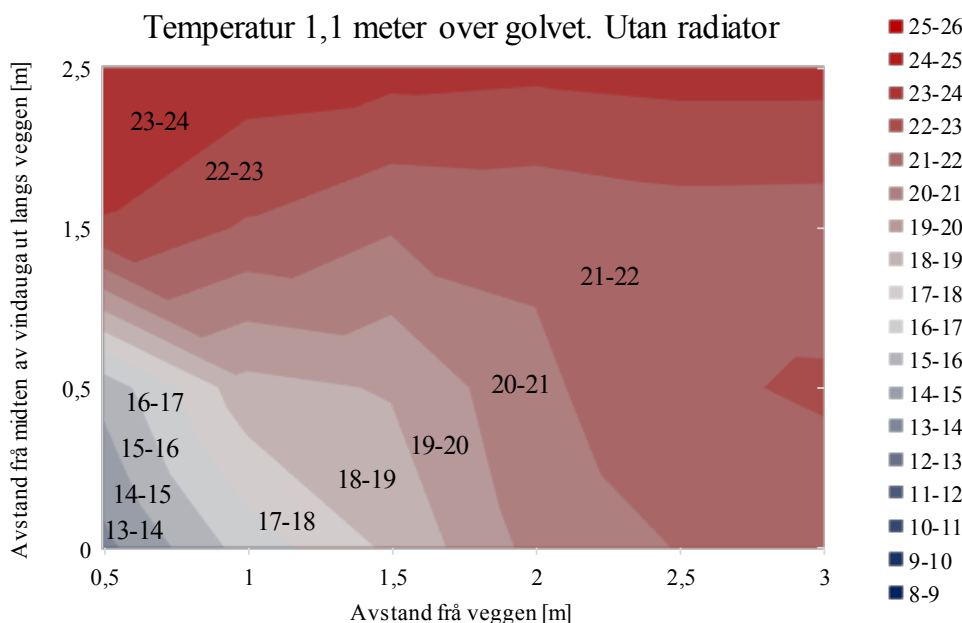
Frå Tabell 2.6 er det anbefalt under 4 °C i temperaturskilnad mellom anklar og hovud. Det vil tilsvare 15 % misnøgde i rommet. For å oppnå den anbefalte prosentdel misnøgde på under 10 % må det vere lågare temperaturforskjell enn 3 °C.

Temperatur i plan

Temperatur i planet ved ankel- og hovudhøgde er vist i høvesvis Figur 5.12 og Figur 5.11. Verdiane for ankelhøgde spenner frå 11, og vil i seg sjølv føre til diskomfort på grunn av låge temperaturar. Når verdiane også vert sett på i samanheng med temperaturar for 1,1 meter over golvet, er det også tydeleg at det er høg temperaturgradient i rommet. Til dømes vil det to meter frå vindauga vere ein forskjell på rundt 7 °C mellom ankel og hovud. Det kan forventast svært mange misnøge personar, grunna låge temperaturar i rommet. Det er interessant å sjå at temperaturen i 1,1 meters-planet ikkje er låg langt innover i rommet. Ved to meter vil det vere nær tilfredsstillande temperatur. Hastigheita i dette punktet er også innanfor krava, slik som det kjem fram frå Figur 5.3.

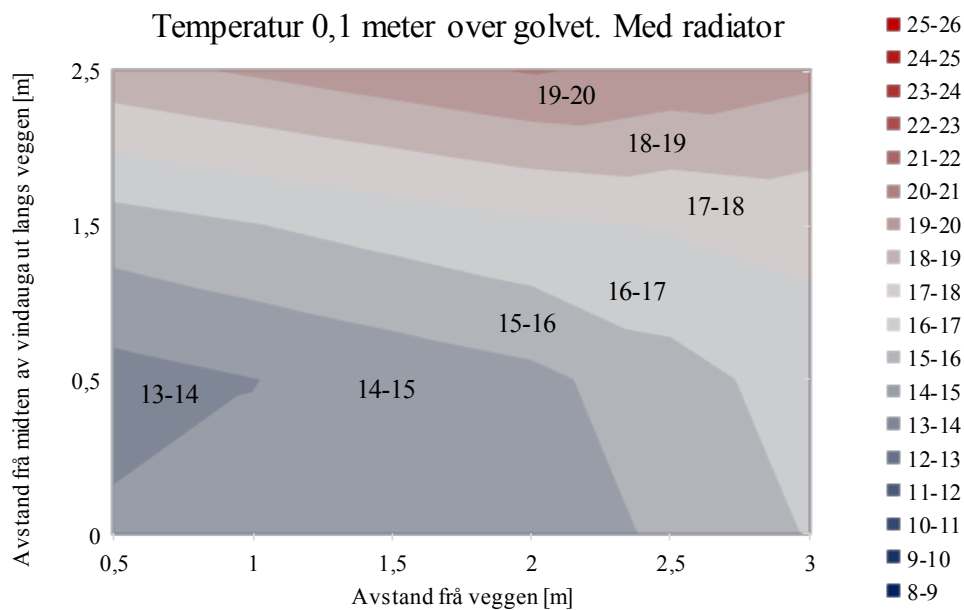


Figur 5.12: Temperatur i ankelhøgde. Målinga vart gjort utan oppvarming. Verdiane

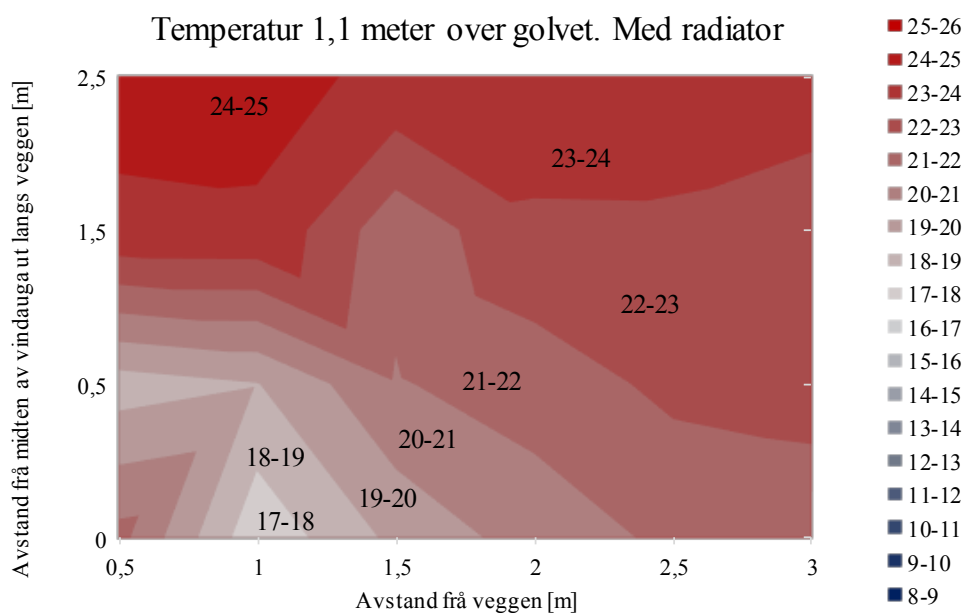


Figur 5.11: Temperatur i hovudhøgde. Målinga vart gjort utan oppvarming i rommet. Temperaturane vil vere tilfredsstillande to meter inn i rommet.

Temperatur for forsøk med radiator under vindauga, er vist for ankelhøgde i Figur 5.14 og i hovudhøgde i Figur 5.13. I begge tilfelle er temperaturane høgare enn utan oppvarming. Interessant er det å sjå at for måling utan radiator er det ned i 11 °C ved vindauga, mens temperaturen aukar raskare innover i rommet, enn i måling med radiator. Sjølv om temperaturen med oppvarming altså ligg på høgare temperaturnivå, er det eit større «varmt» område utan radiator. Samanlikning mellom ankel- og hovudhøgde viser at det vil oppstå stor temperaturgradient. Sjølv om temperaturen 1,1 meter over golvet tilfredsstillar krava for kontorlandskap vil det ikkje vere nok for å unngå misnøye blant personar i området.



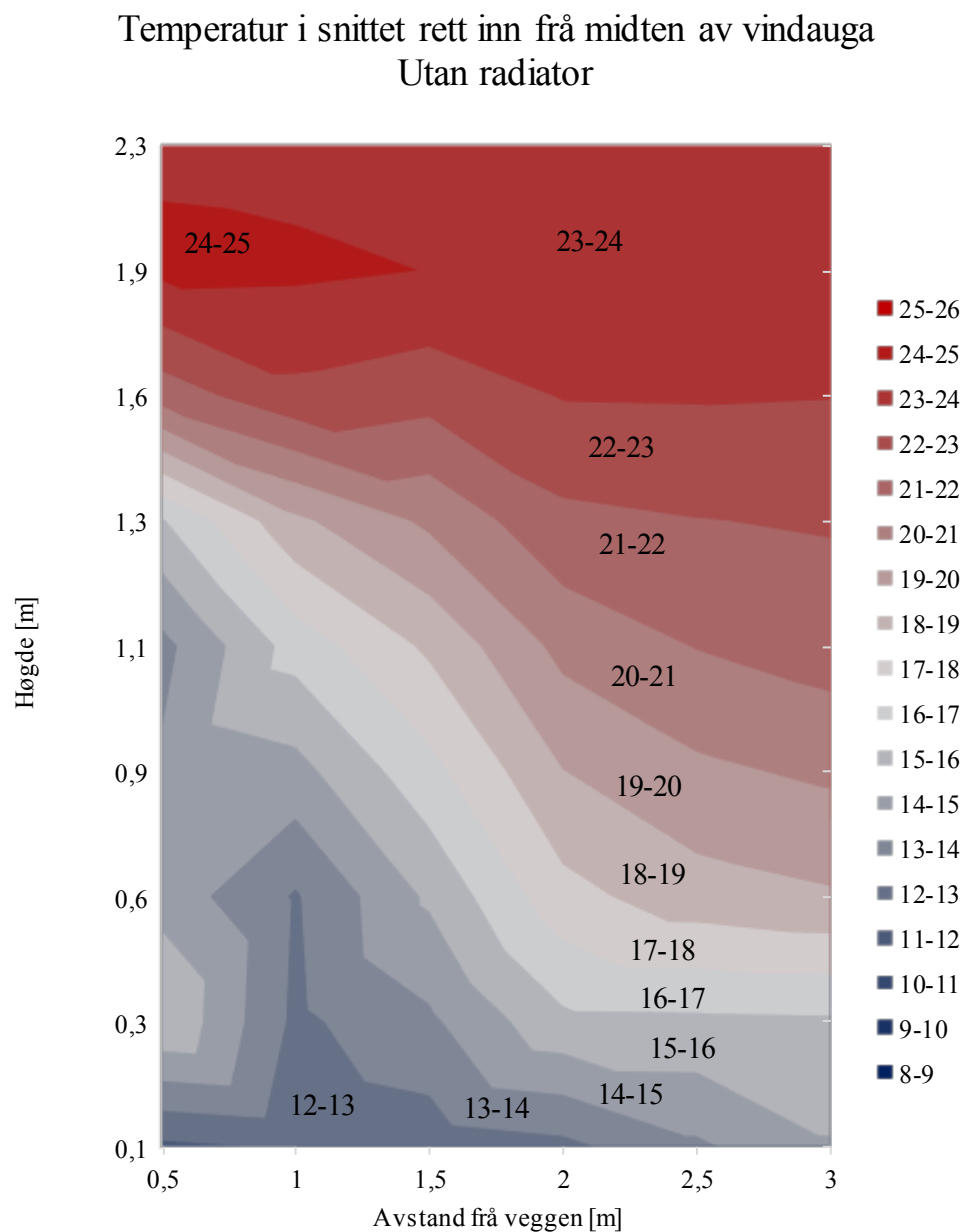
Figur 5.14: Temperatur i, ankelhøgde. Målinga vart gjennomført med oppvarming under vindauga. Verdiande for 1, 2 og 3 meter er interpolerte.



Figur 5.13: Temperatur i hovudhøgde. Forsøket vart gjort med oppvarming. Store delar av rommet vil ha tilfredsstillande temperatur, unntatte rett innanfor vindauga.

Temperatur i snitt

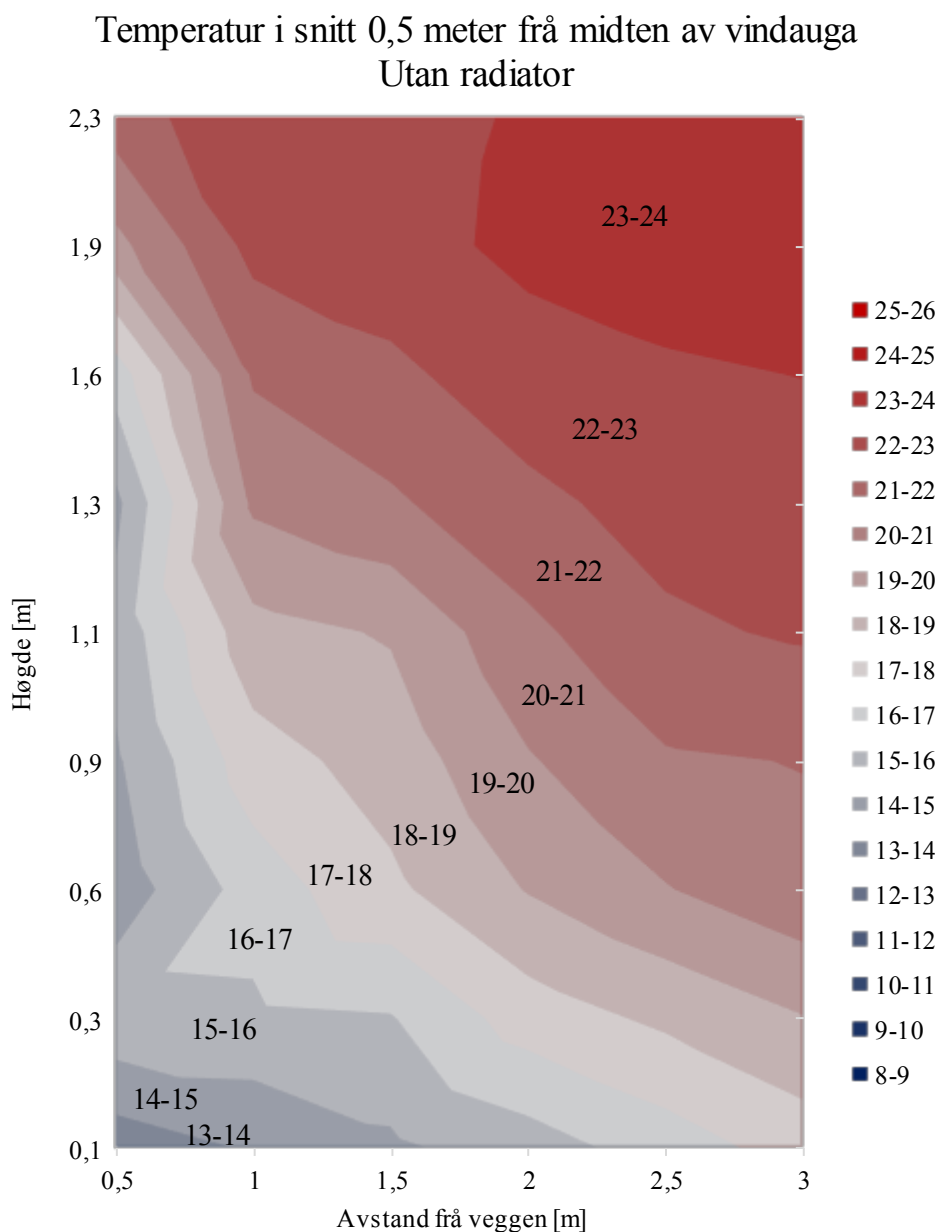
Frå Figur 5.15 kan det observerast låge temperaturar langs golvet. For personar i området vil det oppfattast høg temperaturforskjell mellom anklar og hovud. Mange vil vere plaga med diskomfort grunna temperaturgradient opp mot 6 °C i opphaldssona, og det kan opplevast vanskeleg å arbeide i slike temperaturar over lengre tid.



Figur 5.15: Temperatur i snittet rett inn i rommet frå midten av vindauga. Målinga er gjort utan oppvarming. Det vart målt temperaturgradient opp mot 6 °C.

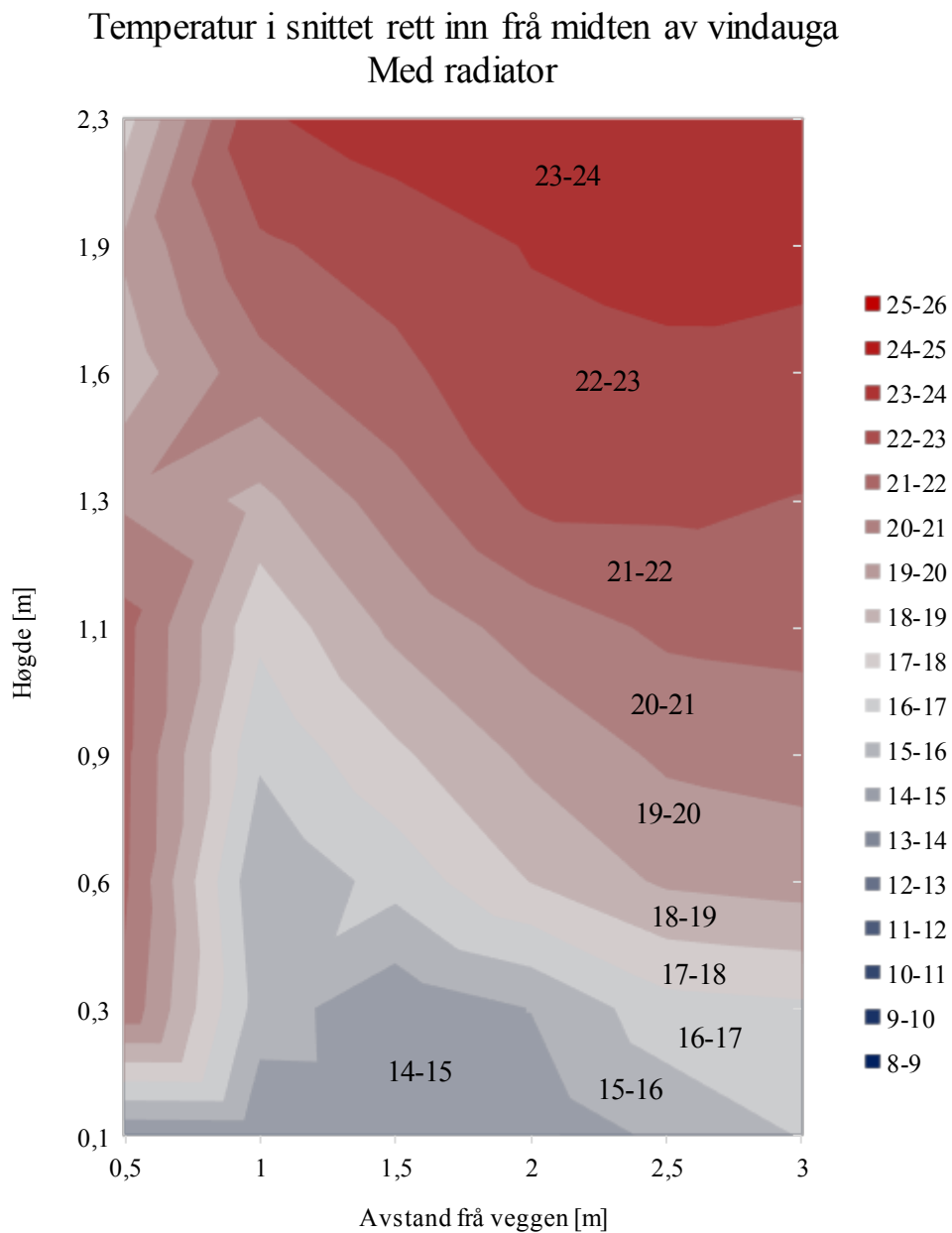
Likt som snittet rett inn i rommet viser Figur 5.16 låge romtemperaturar og høg temperaturgradient. Figuren gjeld for forsøk utan oppvarming, målt ved kanten av vindauga. For dei andre snitta av temperatur, både med og utan radiator, er det eit kaldt område mellom 1 til 1,5 meter inn i rommet. Det er uvisst kvifor det ikkje oppstår eit slikt kaldt område ved denne plasseringa. Det kan tenkjast å ha samanheng med varmare utetemperaturar og låg vindhastigheit på måletidspunktet.

Ved å sjå på både Figur 5.16 og Figur 5.18, som er snitt frå kanten av vindauga, viser ingen av dei teikn til det kastet som oppstår øvst ved 2,3 meter for hastigheit. Sjølv om det altså oppstår turbulens frå øvste del av vindauga, vil ikkje dette påverke temperaturen langs tak og yttervegg.



Figur 5.16: Temperatur i snittet inn i rommet frå kanten av vindauga. Målinga er gjort utan oppvarming. Temperaturgradienten er ikkje innanfor krava.

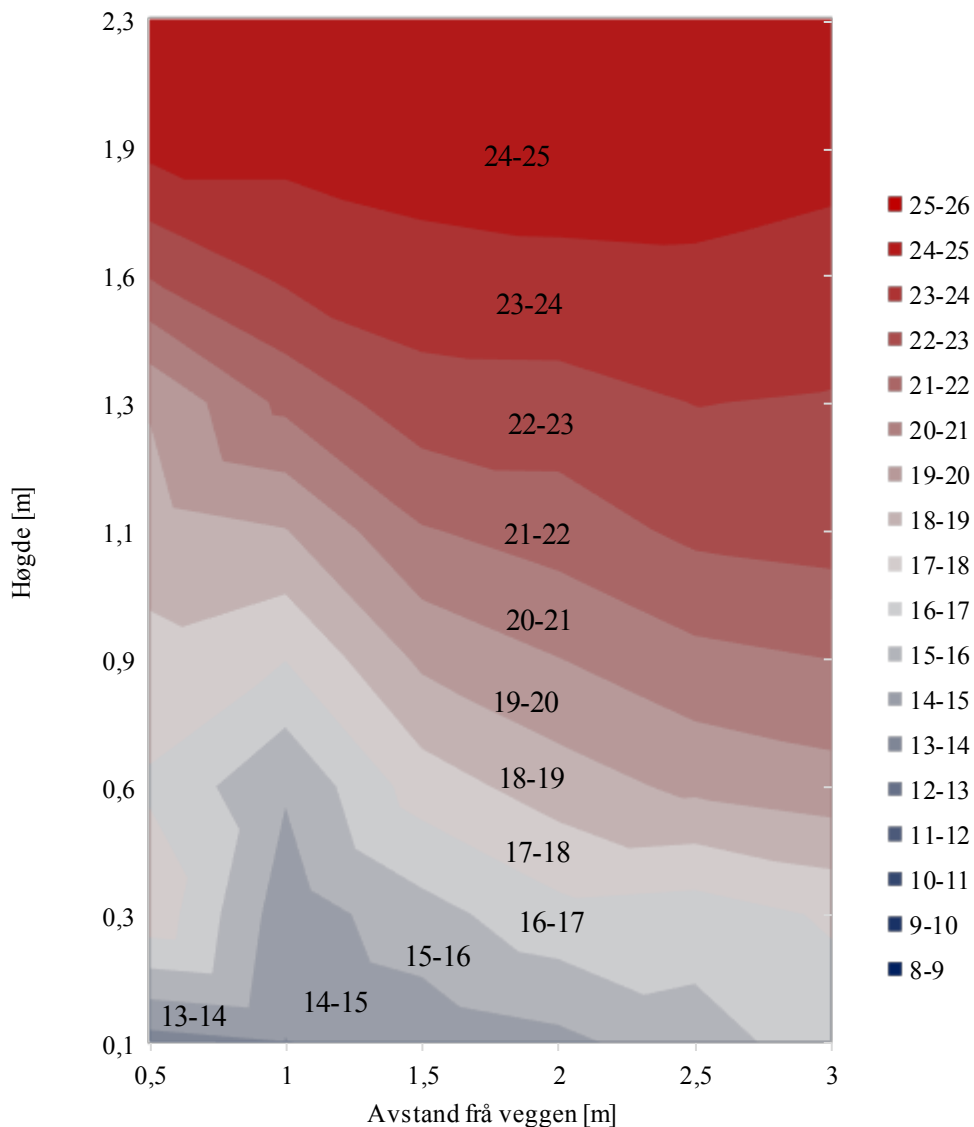
Temperatur i snitt med radiator er vist i Figur 5.17. Samanlikna med snittet utan oppvarming i Figur 5.15 har temperaturane auka. Lågaste temperatur ved lufting var 14 °C i opphaldssona, medan dei varmare sjikta over 18 °C er fortsatt relativt like. Største forskjell er at med radiator, vart den verste kulden ved vindauga redusert. Temperaturgradienten er fortsatt over anbefalingane når det kjem til termisk komfort.



Figur 5.17: Temperatur i snittet rett inn i rommet. Målinga vart gjennomført med oppvarming.

For snittet i Figur 5.18 frå karmen av vindauga er temperaturane høgare enn for snittet rett inn i rommet. Det kan tyde på at lufta høgt opp i rommet ikkje vil bli påverka i stor grad av den kalde utelufta som kjem inn. Gjennom heile målinga var det stabil, høg temperatur over 1,3 meter. Forskjellen mellom anklar og hovud vil likevel vere høg, opp mot 6 °C, og vil føre til ubehag for personar i området.

Temperatur i snittet 0,5 meter frå midten av vindauga
Med radiator



Figur 5.18: Temperatur i snittet frå kanten av vindauga rett inn i rommet. Forsøket er utført med oppvarming. Temperaturgradienten er over 6 °C i måleområdet.

5.2.3 Standardavvik

Sidan det ikkje vart teke omsyn til vêrforholda under behandling av måledata, er det naudsynt å sjå etter andre måtar å vurdere rådata på. Måten dette vart gjort på var å analysere standardavviket til målingane. Det vart teke utgangspunkt i alle målingane i eitt punkt og den berekna gjennomsnittshastigheita i dette punktet. Det var ikkje tid til å gjere dette for alle målepunkta i kvar graf, og det vart difor gjort ei analyse av det snittet som viste teikn til avvik, altså Figur 5.8. Dette vart samanlikna med snittet rett inn i rommet, utan oppvarming, og er framstilt i Tabell 5.1.

Tabell 5.1: Standardavvik for målingar i snittet 0,5 meter langs veggen, utan oppvarming. Tala er henta frå målingane teke ein meter inn i rommet, der det var forventa område med høg hastigheit.

Høgde m	0,0 meter		0,5 meter	
	Gjennomsnittshastigheit \bar{v} m/s	S_d Standardavvik m/s	Gjennomsnittshastigheit \bar{v} m/s	S_d Standardavvik m/s
0,1	0,565	0,115	0,546	0,152
0,3	0,798	0,159	0,552	0,139
0,6	1,089	0,238	0,561	0,248
0,9	0,996	0,163	0,417	0,179
1,1	0,586	0,153	0,254	0,171

Frå analysen er det tydeleg at det kan vere avvik i resultatata, sidan måledata ikkje vart sortert etter vind og temperatur. Dette kjem fram i Tabell 5.1, der gjennomsnittshastigheita for to ulike målingar er presentert. Det kastet som vert funne på dei andre snitta, men ikkje på Figur 5.8, kjem altså av at det har vore lågare vindhastigheiter på tidspunktet målinga vart gjennomført. Til dømes er det i høgda 0,6 meter registrert over 1 m/s rett innanfor rommet, mot 0,56 m/s. ved kanten av vindauga. Generelt er dei målte hastigheitene mykje lågare, noko som vil føre til ein stor skilnad i resultatata. Det spesielle er at standardavviket er svært likt, noko som kan tyde på at oppstår fluktuasjonar i hastigheita.

5.3 CO₂-målingar

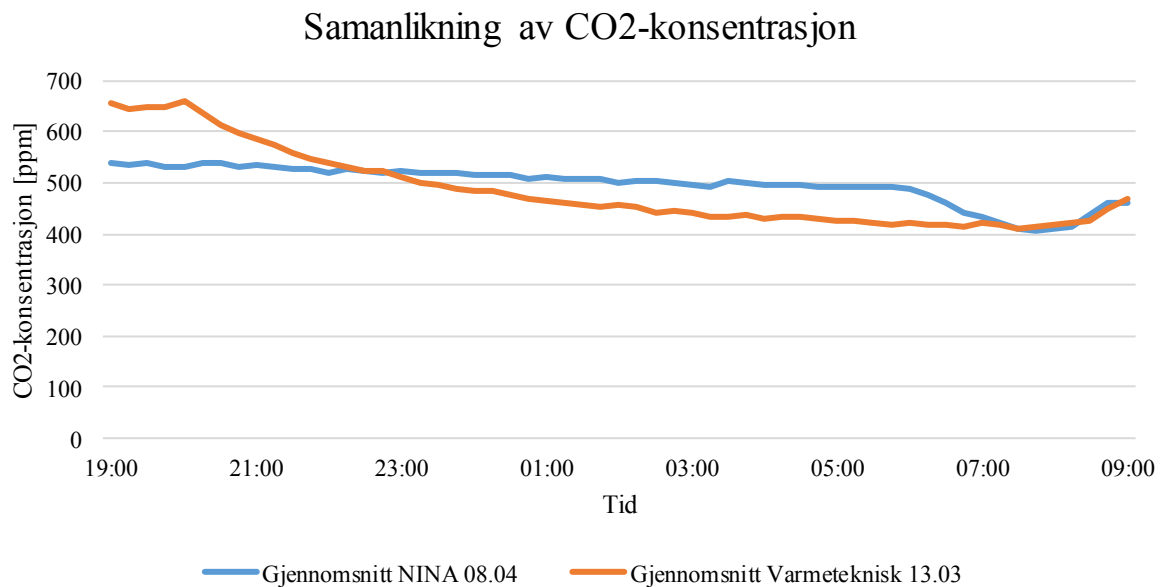
Under forsøka med kontinuerleg- og sjokklufting blei det ikkje gjennomført CO₂-målingar av konsentrasjonen i lesesalen. Forsøka vart gjort på eit tidspunkt med få studentar til stades. Det var på det meste åtte personar igjen på lesesalen når forsøka starta på ettermiddagen, og desse reiste relativt fort. Rundt klokka 20.00 kvar dag, var det ingen igjen i rommet, og det var difor ikkje mogeleg å gjennomføre målingar med naturleg ventilasjon og CO₂-konsentrasjon sidan personbelastninga var for låg.

5.3.1 Samanlikning av Varmeteknisk og NINA-huset

Som nemnt i kapittel 4.3.3 vart det gjennomført CO₂-målingar i både NINA-huset og Varmeteknisk. Verdiane er henta frå måling på nattetid for å unngå påverking av personar i lokalet.

Verdiane er henta frå ei tilfeldig natt i periodemålingane, høvesvis 8. april og 13. mars.

Som det kjem fram frå Figur 5.19, er konsentrasjonen i NINA-huset klokka 19.00 rundt 550 ppm. I Varmeteknisk er det naturleg å tru at det har vore personar i lesesalen, sidan det er stabil konsentrasjon fram til 20.00. Etter det fell CO₂-konsentrasjonen i Varmeteknisk relativt raskt fram til klokka nærmar seg 05.00, då den stabiliserer seg. Det er ikkje mogeleg å sjå frå grafen kva tid ventilasjonen i bygget slår seg på. Grunnen for den raske nedgangen er utett byggkonstruksjon med høgt lekkasjetal, slik at lufta inne vert uttynna.



Figur 5.19: Samanlikning av CO₂-konsentrasjonar for NINA huset og Varmeteknisk.

I NINA-huset derimot held konsentrasjonen seg stabil natta gjennom, med ein total reduksjon på rundt 50 ppm. Klokka 06.00 er det eit tydeleg dropp i konsentrasjonen, og stemmer godt overeins med driftstida og at ventilasjonen startar opp. Ut i frå Figur 5.19, kan ein konkludere med at Varmeteknisk har eit mykje høgare lekkasjetal og luftskifte grunna bygningskroppen, enn det NINA-huset har. Dette samsvarer med forventningane til resultatet basert på kjennskap til byggeår og konstruksjon, og vert nytta som grunnlag for å dokumentere tetttheita til bygget.

6. Berekingar

I dette kapitlet er det fyrst gjort berekingar på misnøgde grunna trekk og temperaturforskjell basert på målingane gjort tidlegare. Dei matematiske modellane vert brukt til å berekne tilføre luftmengder og vidare samanlikna med krav til luftmengder i kontorbygg. Feilkjelder vert kommentert i diskusjonen.

6.1 Analyse av termisk komfort

For å vurdere om krava til termisk komfort vert oppfylt vart det gjort berekingar for lokal diskomfort. Det vart teke utgangspunkt i målingane for 1, 2 og 3 meter, både for måling rett inn i rommet og frå kanten av vindauga. Komfortkriteria er vurdert for lufting med og utan oppvarming under vindauga.

6.1.1 Misnøgde grunna trekk

Likning (2.5) vart nytta for å finne prosentdel misnøgde personar grunna trekk. Det er teke utgangspunkt i verdier 0,1 meter over golvet. Grunnen for dette, er å nytte den høgaste hastigheita i rommet, som ein forventar å finne langs golvet, for dermed å finne høgaste moglege prosentdel misnøgde personar i rommet. Det er berekna DR, misnøgde grunna trekk, for kvar meter bakover i rommet.

Tabell 6.1: Bereking av prosent misnøgde grunna trekk.

Avstand frå vindauga	\bar{v} Gjennomsnittshastigheit [m/s]	S_d standardavvik [m/s]	T_{ankel} [°C]	Turbulensintensitet [%]	DR [%]
Utan radiator - rett inn i rommet					
1 meter	0,565	0,115	12,1	20,31	107,1
2 meter	0,711	0,075	12,7	10,51	97,1
3 meter	0,699	0,069	14,9	9,94	83,3
Med radiator - rett inn i rommet					
1 meter	0,552	0,061	14,2	11,14	69,8
2 meter	0,774	0,100	14,3	12,85	109,8
3 meter	0,783	0,113	16,1	14,41	108,3
Utan radiator - 0,5 meter ut langs vegg					
1 meter	0,546	0,152	14,1	27,87	113,0
2 meter	0,531	0,155	15,5	29,14	104,0
3 meter	0,477	0,179	17,4	37,51	95,5
Med radiator - 0,5 meter ut langs vegg					
1 meter	0,693	0,110	14,0	15,84	109,6
2 meter	0,616	0,135	14,7	21,86	110,0
3 meter	0,606	0,066	16,5	10,91	68,0

Utrekna verdiar for DR i Tabell 6.1 viser at det i mange tilfelle vil over 100 % vere misnøgde, og ein går ut frå 100 % misnøgde. Alle hastigheitene er relativt høge samanlikna med anbefalte verdiar i kontorlandskap, sjå Tabell 2.6, der kategori C er definert opp til 0,21 m/s for vinterhalvåret. Målte verdiar er mykje høgare, opptil 0,78 m/s tre meter inn i rommet med radiator. Slike høge hastigheitar er svært høge, og vil føre til misnøgde i eit kontorlandskap. Ut i frå målte hastigheitar og berekna DR vert ikkje komfortkriteria oppfylt.

6.1.2 Misnøgde grunna temperatur

For å vurdere prosentdel personar som er misnøgde grunna temperatur, vart likning (2.7) nytta. Den vertikale temperaturgradienten vert analysert med tanke på om temperaturforskjellen mellom ankel og hovud er merkbar og vil føre til diskomfort.

Tabell 6.2: Berekning av prosent misnøgde personar grunna vertikal temperaturgradient.

Avstand frå vindauge	T _{ankel} °C	T _{hovud} °C	ΔT °C	PD %
Utan radiator - rett inn i rommet				
1 meter	12,1	16,4	4,3	11,1
2 meter	12,7	20,3	7,6	66,9
3 meter	14,9	21,5	6,6	46,2
Med radiator - rett inn i rommet				
1 meter	14,2	17,3	3,0	4,0
2 meter	14,3	20,4	6,1	36,6
3 meter	16,1	21,3	5,3	22,4
Utan radiator - 0,5 meter ut langs veggen				
1 meter	14,1	18,7	4,6	13,4
2 meter	15,5	20,8	5,2	21,9
3 meter	17,4	22,1	4,7	14,7
Med radiator - 0,5 meter ut langs veggen				
1 meter	14,0	19,0	5,0	18,3
2 meter	14,7	21,5	6,7	50,0
3 meter	16,5	22,4	6,0	34,2

Komfortkriteria for temperatur er vurdert i Tabell 6.2. Misnøgde grunna høg vertikal temperaturgradient vart berekna, og verdiane varierer frå 4 % til 66 %. Resultata er svært varierende. Ved å berre vurdere verdiane for utrekna PD, vil det vere mykje høgare enn dei anbefalte kategoriane for termisk miljø, som vart presentert i Tabell 2.5. Nasjonale retningslinjer anbefalar under 10 % misnøgde personar grunna temperatur, medan resultata i dette forsøket viser høgare verdiar. Samtidig er det ikkje tilstrekkeleg å berre sjå på PD.

Temperaturforskjellen mellom ankel og hovud er relativt høg for alle vurderte punkt, då det normalt er anbefalt under 3 °C forskjell. T_{ankel} og T_{hovud} viser også låge temperaturar i rommet, spesielt i ankelhøgde, ned mot 12 °C i enkelte tilfelle. Ved slike temperaturar vil dei aller fleste reagere på kulden, slik at PD ikkje nødvendigvis er representativt i slike tilfelle. Ut frå dei målte temperaturane og berekna PD, vert ikkje komfortkriteria for temperatur oppfylt.

6.2 Nødvendig luftmengde

For å berekne kor store luftmengder det aktuelle kontorlandskapet treng vart dette berekna for ulike metodar. Det vart teke utgangspunkt i 30 personar i kontorlandskapet på 184,6 m². Utrekna verdiar for luftmengd er vist i Tabell 6.3. Utrekningar, formlar og brukte parametere ligg i Vedlegg D. Anbefalt luftmengd frå TEK10, vart berekna til 1260 m³/t.

Tabell 6.3: Berekna nødvendig luftmengde i rommet.

Luftmengde	Verdi	Eining
Basert på emisjon (TEK10)	1260	m ³ /t
Basert på opplevd luftkvalitet	1462	m ³ /t
Basert på CO ₂ -nivå	900	m ³ /t

6.2.1 Samanlikning med matematiske modellar

For å berekne teoretisk luftmengd gjennom eitt vindauge, vart modellane som er presentert i kapittel 2.3 brukt. Førehandsbestemte parametrar brukt til berekningane er gitt i Tabell 6.4. Verdiar for $|C_p|$, $f(\beta)$ og $\Delta C_{p,\text{opening}}$ vart lest av frå høvesvis figur 8, 9 og 11 i artikkelen til Larsen og Heiselberg (2008). Det vart vald ein temperaturforskjell mellom inne- og uteluft på 20 °C, tilsvarande rundt null grader ute.

Tabell 6.4. Parametrar som vart nytta i berekning for matematiske modellar.

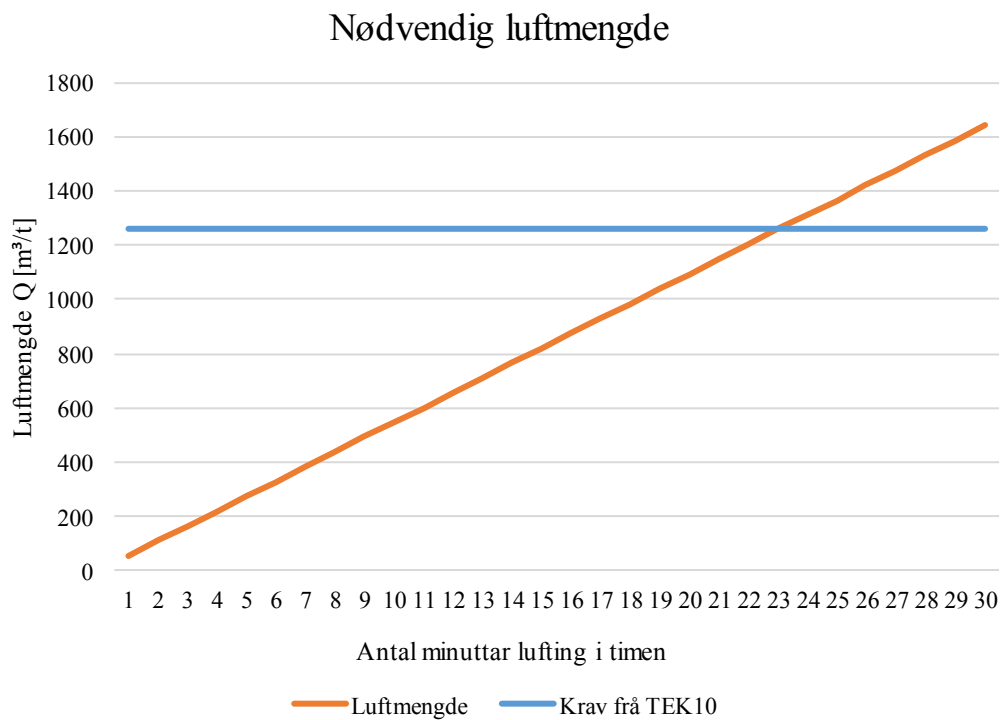
Parameter	Verdi	Eining
Areal av opning A	0,62	m ²
Høgde av opning H	1,011	m
Temperaturforskjell ΔT	20	K
Volum	553,8	m ³
De Gids og Phaffs metode		
Vindavhengig koeffisient C_1	0,001	-
Oppdriftskoeffisient C_2	0,0035	-
Turbulenskonstant C_3	0,01	-
Larsen og Heiselbergs metode		
Vindavhengig koeffisient C_1	0,005	-
Oppdriftskoeffisient C_2	0,0009	-
Turbulenskonstant C_3	0,016	-
Innfallsvinkel β	210	°
Funksjon av innfallsvinkel $f(\beta)$	0,2	°
Trykkoeffisient $ C_p $	0,7225	-
Største avvik $\Delta C_{p,opening}$	0,035	-

Ut frå likning (2.10), (2.13) og (2.14) vart teoretiske luftmengder berekna for dei ulike matematiske modellane. Resultata er vist i Tabell 6.5, og Warrens metode skil seg tydeleg ut frå dei to andre. I vidare berekningar vert det difor teke utgangspunkt i resultata frå De Gids og Phaff, og Larsen og Heiselberg. Det er berekna vidare med ei luftmengde på 3280 m³/h når alle ti vindauga vert brukt, og representerer gjennomsnittsverdien for 3 m/s for dei to sistnemnte modellane.

Tabell 6.5: Utrekna luftmengder for ulike vindhastigheitar.

Vindhastigheit	De Gids og Phaff m ³ /t		Warren m ³ /t		Larsen og Heiselberg m ³ /t	
	10		10		10	
	1 vindauga	vindauga	1 vindauga	vindauga	1 vindauga	vindauga
1 m/s	319,1	3191,3	55,8	558,0	383,6	3836,3
2 m/s	324,9	3249,3	111,6	1116,0	327,9	3278,5
3 m/s	334,4	3343,7	167,4	1674,0	321,5	3214,6
4 m/s	347,2	3471,6	223,2	2232,0	325,1	3250,6
5 m/s	362,9	3629,5	279,0	2790,0	333,0	3330,0

Sjølv om verdiane som vart funne i Tabell 6.5 faktisk tilfredsstillar krava til luftmengde, må det takast omsyn til at dette gjeld når det vert tilført luft konstant. Med sjokklufting vil det berre vere lufting delar av tida, og dei utrekna luftmengdene vil difor ikkje vere reelle. Dette vart undersøkt nærmare, med utgangspunkt i 3280 m³/timen og 3m/s. Figur 6.1 viser ei grafisk framstilling av tilført luftmengde som funksjon av kor lengde det vert lufta. For å oppnå krava til TEK10 må det altså luftast over 23 minutt kvar time, med ti vindauger med opningsareal på 0,62 m².



Figur 6.1: Luftmengde som ein funksjon av minutt lufting i timen, gitt vindhastigheit 3 m/s.

7. Simulering

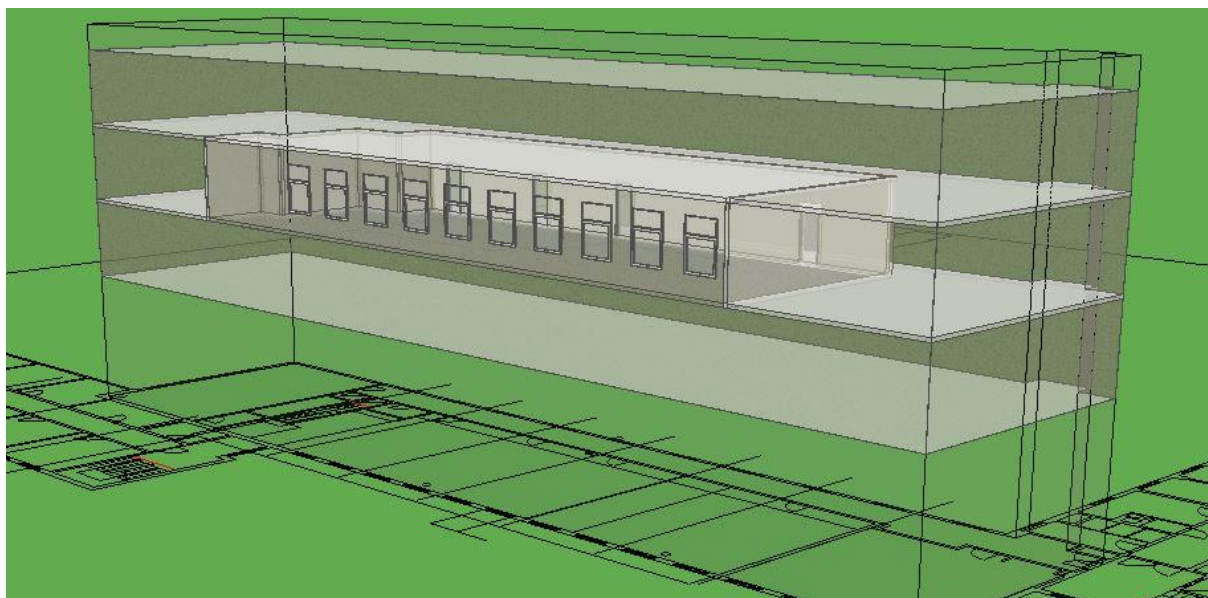
Fyrst i dette kapittelet er det gjennomgang av simuleringmodellen som vart laga i IDA ICE. Vidare vert det presentert kva parameterar som er lagt inn og forklaring på dei tre ulike driftsstrategiane som vart simulert. Resultata frå simuleringa er gitt i neste kapittel.

IDA Indoor Climate and Energy er eit simuleringverktøy som kan modellere bygningar med dei aktuelle systema og kontrollsystema, slik at lågast mogleg energiforbruk og best mogleg komfort kan forsikrast. IDA ICE legg vekt på interaktiv 3D-modellering for å kunne visualisere resultata. Programmet er utvikla av svenske EQUA Simulation AB (EQUA, 2016).

For å validere resultata frå målingane er det utført inneklimasimuleringar i IDA ICE, versjon 4.7. Det vart undersøkt vidare kva innverknad det vil ha med personar i rommet, samtidig som det er føreteke ei samanlikning av kontorlandskapet når det er plassert i eitt gammalt og eitt nytt bygg.

7.1 Inndata

Ein forenkla modell av lesesalen vart laga i IDA ICE. Bygget som vart lagt inn i IDA ICE vart avgrensa til ein kontorfløy, slik som modellen viser i Figur 7.1. Modellen består av fire soner, der sone 1 vert nytta til vidare analysar med naturleg ventilasjon. Sone 1 er vist i Figur 7.2. For å unngå at dei nærliggjande sonene (sone 2-4) påverka resultatet for simuleringa vart U-verdi på alle ytterveggar sett til $0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$ med konstant innetemperatur mellom 21 og $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Vindauge, dører og innerveggar vart ikkje modellert i dei nærliggjande sonene.



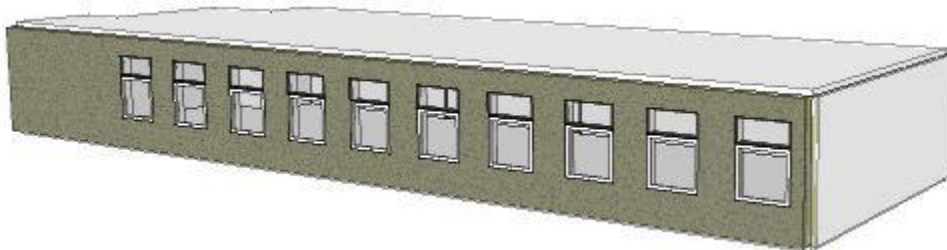
Figur 7.1: Forenkla modell til simulering. IDA ICE.

Personar til stades og driftstid for belysning og utstyr er satt til 08.00 – 17.00 i vekedagar, med samtidigheit på 100 % i sone 1. Det er lagt inn ti vindauge i sonen, der berre nedste del av vindauga kan opnast. Tal personar i rommet er berekna ut frå anbefalinga om 6 m² per arbeidsplass i kontorlandskap (Arbeidstilsynet, 2013a). Parametra som er endra i IDA ICE er gitt i Tabell 7.1 og gjeld for begge versjonar av modellen. Der ikkje anna er nemnd er standardverdiane i IDA ICE brukt.

Tabell 7.1: Inndata i IDA ICE.

Inndata	Verdi	Eining
Retning av bygget	260	°
Golvareal i sone 1	184,6	m ²
Takhøgd	3	m
A _{NedreVindaug}	1,44	m ²
A _{ØvreVidnaug}	0,67	m ²
Personar i rommet	30	stk
Bekledning	0,85 ± 0,25	clo
Aktivitetsnivå	1,2	met

Ut frå den forenkla modellen i Figur 7.1 vart det laga to ulike versjonar. Ein versjon med inndata som tilsvara U-verdiar for Varmeteknisk «eldre bygg», og ein med verdiar tilsvarande NINA-huset, «nytt bygg». Dei verdiane som er ulike står lista opp i Tabell 7.2. Tre ulike simuleringar med forskjellig tidsplan for lufting er kjørt for begge versjonane, sjå kapittel 7.2.



Figur 7.2: Den aktuelle sonen for simulering. IDA ICE.

Tabell 7.2: Parametrar som er ulike for nytt og eldre bygg..

Parameter	Eldre bygg	Nytt bygg	Eining
U-verdi dekke	3,6	0,35	W/m K
U-verdi yttervegg	0,83	0,14	W/m K
U-verdi vindaug	1,5	0,7	W/m K
Kuldebruverdi	0,08	0,03	W/mK
Lekkasjetal	5,5	0,3	h ⁻¹

7.2 Tidsskjema for lufting

Det vart utarbeida tre ulike tidsplanar for korleis luftinga skulle gjennomførast i simuleringane. Når desse vart brukt i IDA ICE vart alle ti vindauge i modellen opna til 1, altså fullstendig opent vindaug. Resten av døgnet er vindauge stengt – verdi 0 i IDA ICE. I helgene og heilagdagane er det ikkje lufting i bygget. Same tidsskjema er simulert for begge versjonane av modellen.

Når luftestrategiane vart utvikla vart det teke stort omsyn til å ha så korte lufteperiodar som mogeleg. Dette var for å unngå for lang eksponeringstid for trekk og låge temperaturar. Det er difor berre lagt inn lengre lufteperiodar før og etter arbeidsdagen. Resultat frå simuleringane vart presentert i neste kapittel.

7.2.1 Simulering A: Lufting tre gonger

Første simulering var relativt enkel med tre luftingar gjennom dagen. Klokkane 07.00 og 16.00 vart det lufta i ti minutt, mens det klokka 12 vart lufta i tre minutt. Klokkesletta vart valde på bakgrunn av når det er personar i kontorlandskapet, der første lufting er før folk kjem på arbeid. Det er lagt inn lufting i lunsjen og når folk byrjar å gå heim.

- Målet var å undersøkje om krava vert tilfredsstillt ved å lufte over lengre periodar før og etter arbeidsdagen, med ein kort periode midt på dagen.

Tabell 7.3: Tidsskjema for lufting med vindauge tre gonger i løpet av arbeidsdagen. Lufting kl. 12.00 er kortare enn kl. 07.00 og 16.00.

Opne	Lukke
07:00	07:10
12:00	12:03
16:00	16:10

7.2.2 Simulering B: Annakvar time

I denne simuleringa vart det lagt inn lufting annakvar time. Før arbeidsdagen starta, kl. 06.00, og etter folk har gått frå arbeide, kl. 18.00, er det lagt inn lengre periodar med lufting. Annakvar time var det tre minutt lufting av lokalet.

- Målet var å sjå om mange, korte lufteperiodar gjennom dagen kunne vere nok til å behalde temperaturen i rommet samtidig som CO₂-konsentrasjonen var innanfor krava.

Tabell 7.4: Tidsskjema for lufting annankvar time.
Lengre lufting kl.06.00 og 18.00.

Opne	Lukke
06:00	06:10
08:00	08:03
10:00	10:03
12:00	12:03
14:00	14:03
16:00	16:03
18:00	18:10

7.2.3 Simulering C: Kvar time

Vidare vart det kjørt simulering med lufting på to minutt kvar time. Klokka 06.00, 12.00 og 18.00 vart lufteperioden utvida til fem minutt for å få større utskifting av lufta.

- Målet var å vurdere om korte lufteperiodar gjennom heile dagen kan halde CO₂-nivået nede og temperaturen oppe.

Tabell 7.5: Tidsskjema for lufting kvar time.
Lengre lufteperiode kl. 06.00, 12.00 og 16.00.

Opne	Lukke
06:00	06:05
07:00	07:02
08:00	08:02
09:00	09:02
10:00	10:02
11:00	11:02
12:00	12:05
13:00	13:02
14:00	14:02
15:00	15:02
16:00	16:02
17:00	17:02
18:00	18:05

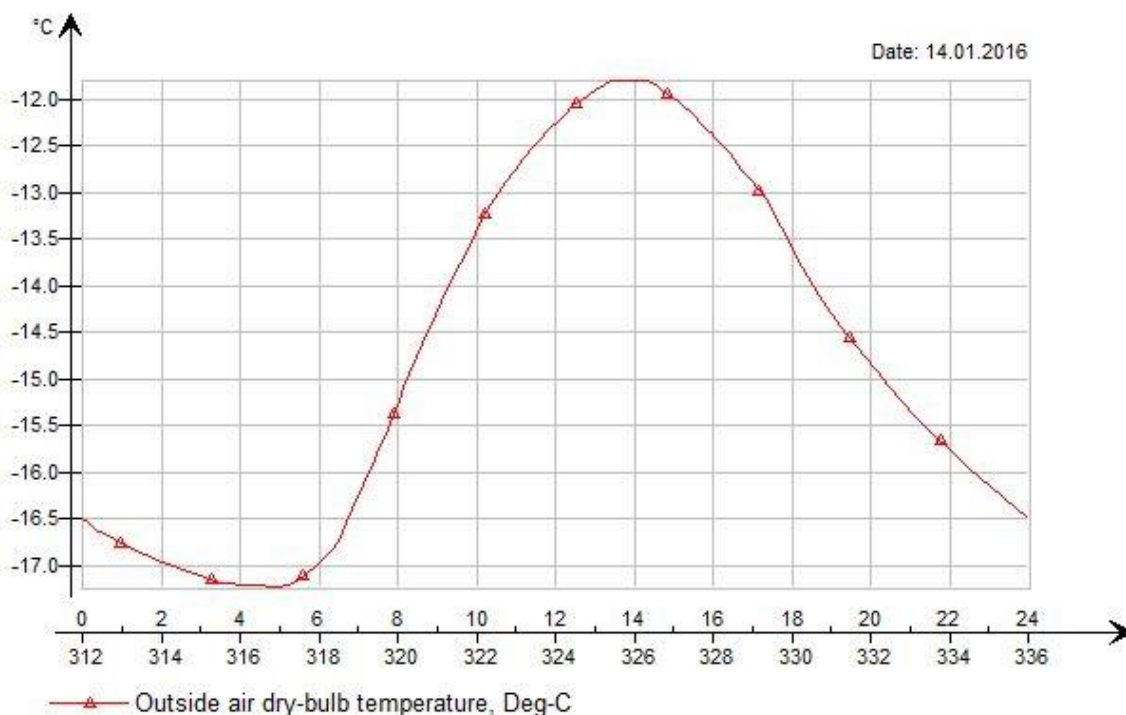
8. Resultat simuleringar

Målet med simuleringane var å undersøkje CO₂-nivåa i bygget, samstundes som temperatur vart vidare undersøkt. Varmeteknisk og NINA-huset er nytta som representantar for kvar sin bygningskategori, og er kalla «eldre bygg» og «nytt bygg». Dei største forskjellane ligg som nemnt i korleis bygningskonstruksjonen er bygd opp.

Det er valt å fokusere på resultatata for temperatur, luftkvalitet og komfortindeksane PMV og PPD. Alle grafane er henta frå IDA ICE. Etter presentasjonen av kvar simulering er det gitt ei kort oppsummering. Simuleringsresultata vert vidare diskutert og samanlikna med feltmålingar og berekningar i kapittel 9.

Vald dag for simulering

Alle simuleringar vart gjennomført med 14.januar 2016 som standarddato for vintersimulering. Resultata for sommartid vert ikkje analysert i denne rapporten, då må det anna luftestrategi til for å unngå høge temperaturar. For vald dato var utetemperaturane svært låge, med lågaste temperatur under -17 °C på natta. Temperaturkurven for døgeret er vist i Figur 8.1. Gjennomsnittstemperaturen gjennom døgeret er -14,75 °C. Vêrdata i IDA ICE er ikkje reelle data, men basert på ein kunstig 24-timers modell laga av programmet. Uteforholda i modellen kan difor avvike frå verkelege vêrdata.



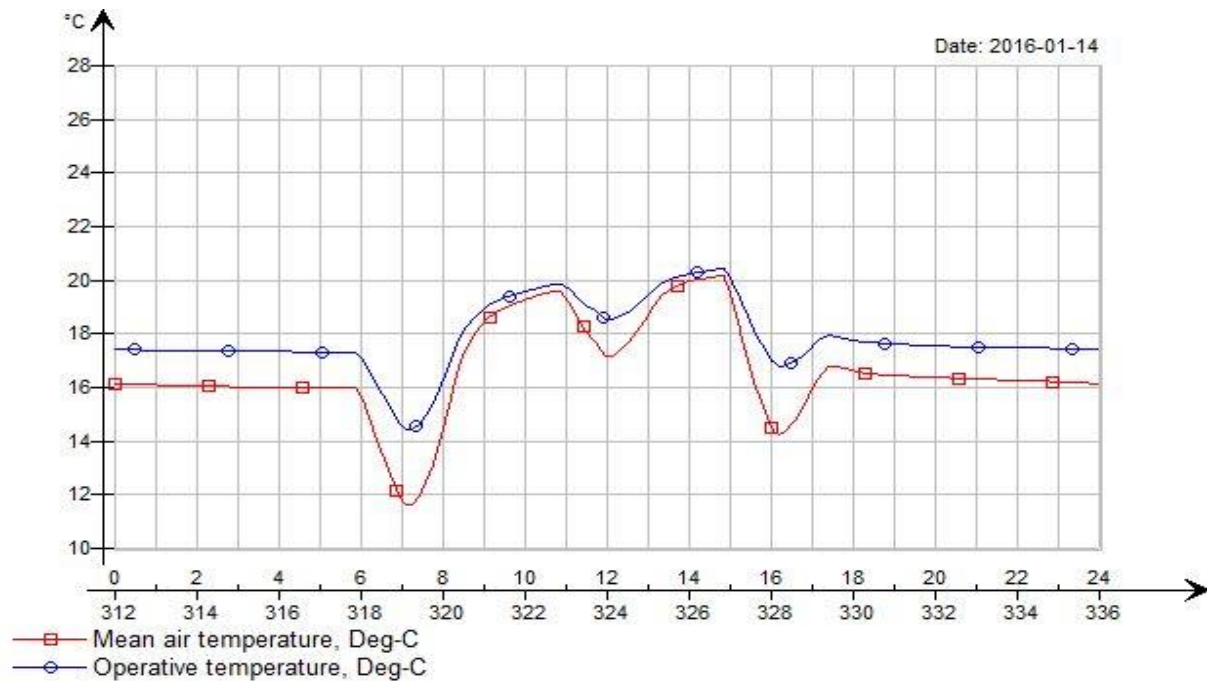
Figur 8.1: Utetemperatur gjennom døgnet for simulering, 14.januar 2016. IDA ICE.

8.1 Simulering A

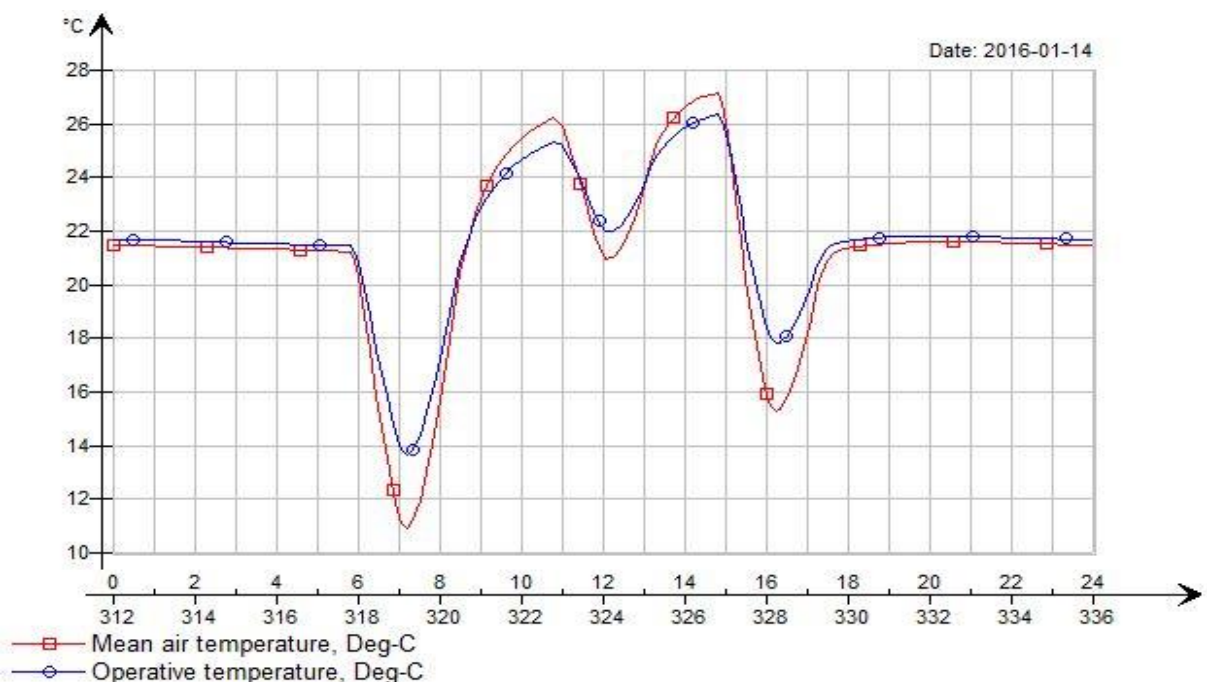
I den fyrste simuleringa vart det lufta tre gonger i løpet av arbeidsdagen. Det vart valt få luftingar for å undersøkje om komfortkriteria kunne tilfredsstillast gjennom få, lange periodar. Klokka 07.00 og 16.00 vart det lufta i ti minutt, og klokka 12.00 vart det lufta i tre minutt. Bakgrunnen for val av klokkeslett, var å vurdere om det var nok å lufte mykje før arbeidsdagen starta og i slutten, med ein kort lufteperiode rundt lunsjtider.

8.1.1 Temperatur

Ved tre lange luftingar gjennom dagen vil temperaturen bli prega av dette. Som Figur 8.2 og Figur 8.3 viser, vil det vere stor forskjell i innetemperaturen i nytt og gammalt bygg. I arbeidstida mellom klokka 08.00 og 17.00 er temperaturen på det lågaste 16 °C i det eldre bygget, og går maksimalt opp til 20 °C. I eit nytt bygg, vil temperaturen i arbeidstida ligge mesteparten over 22 °C. Når det vert lufta klokka 07.00 og 16.00, er det tydeleg at temperaturen fell. Temperaturen i eldre bygg er altså ikkje tilfredsstillande. I store delar av arbeidstida, vil den operative temperaturen i den nye bygningen vere innanfor krava til temperatur for kontorbygg, men det er prega av temperatursvingingar.



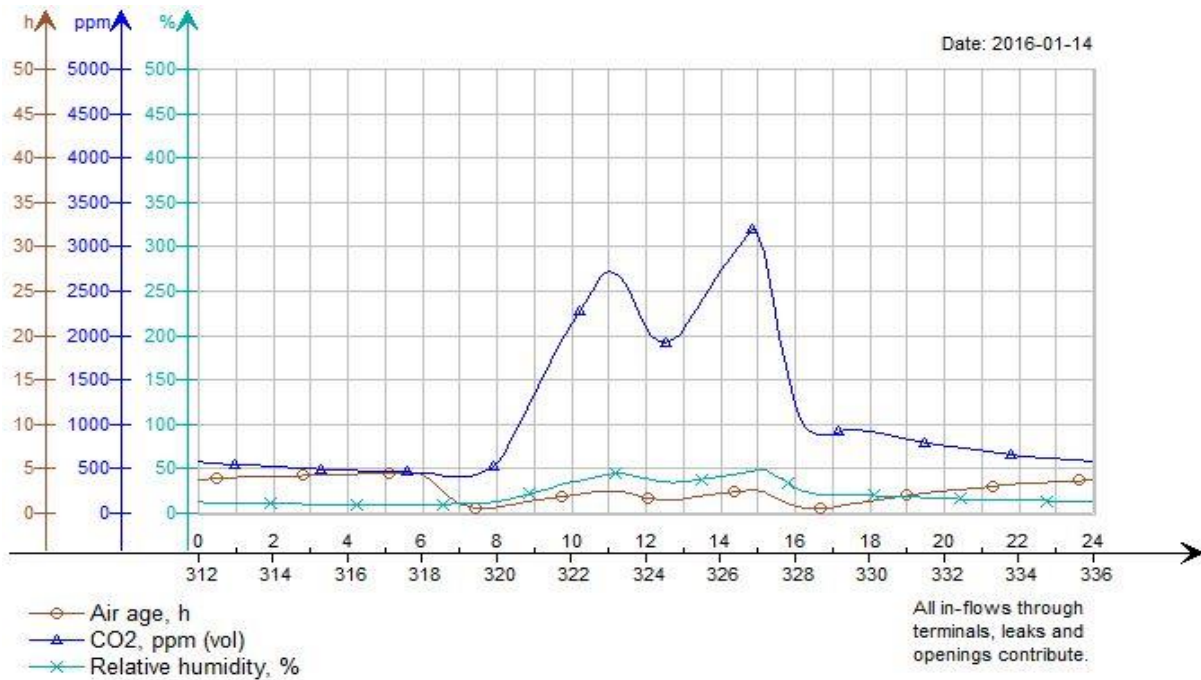
Figur 8.2: Temperatur i gammalt bygg med lufting tre gonger om dagen. IDA ICE.



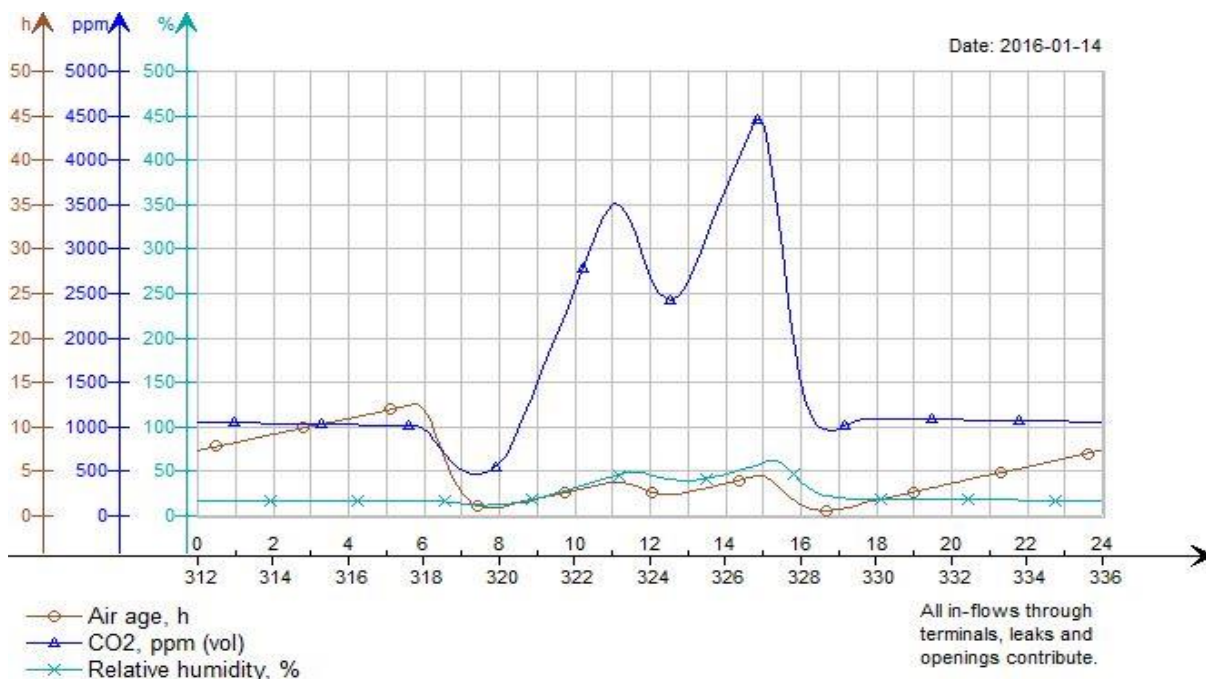
Figur 8.3: Temperatur i nytt bygg med lufting tre gonger. IDA ICE.

8.1.2 Luftkvalitet

Luftkvaliteten i både nytt og gammalt bygg vil ligge over krava til atmosfærisk inneklima. Som grafane i Figur 8.4 og Figur 8.5 viser, vil CO₂-konsentrasjon i det gamle bygget overstige 3000 ppm på det verste. I den nye bygningen vil det nå opptil 4500 ppm. Verdiane er langt over dei anbefalte 1000 ppm, som er nemnt i Tabell 2.9. Konsentrasjonen i nytt bygg vil søkke lite over natta. På grunn av lite ventilering på kveldstid vil det fortsatt vere høge konsentrasjonar ved fyrste lufting dagen etter, som det kjem fram frå Figur 8.5. Analyse av luftalder viser at det er godt luftskifte ved lufting klokka 07.00. Tre minutt lufting klokka tolv ikkje er nok for å skifte ut all lufta i rommet.



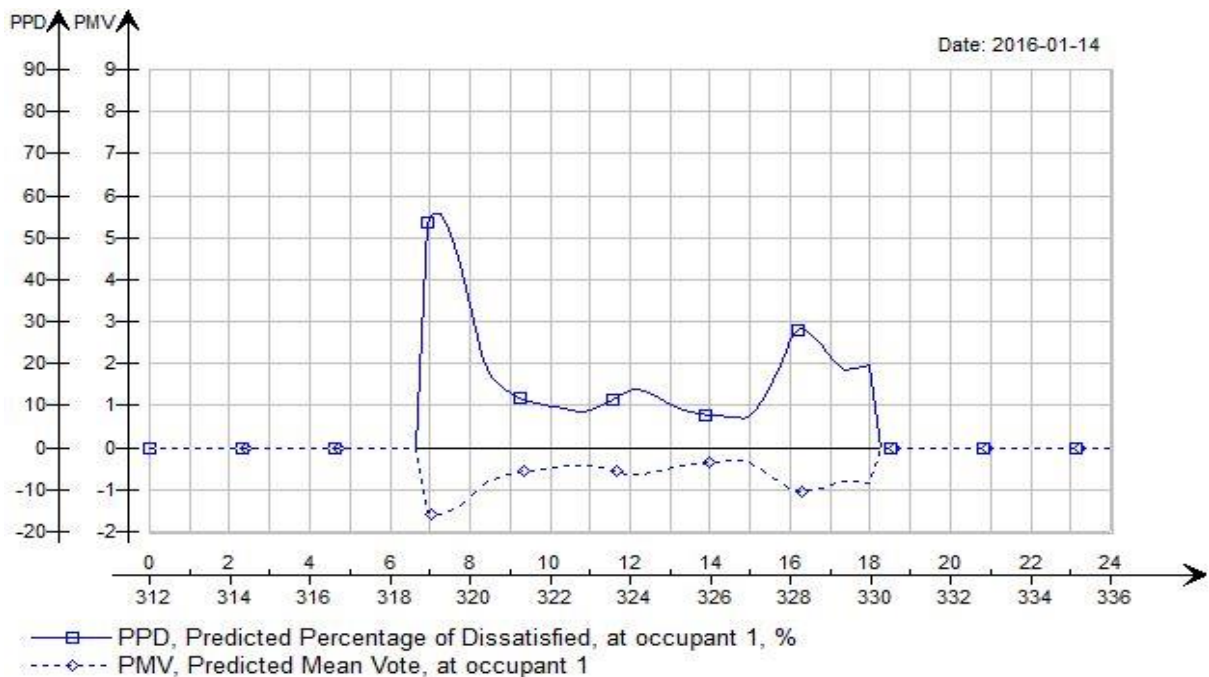
Figur 8.4: Luftkvalitet i eldre bygg med lufting tre gonger om dagen. IDA ICE.



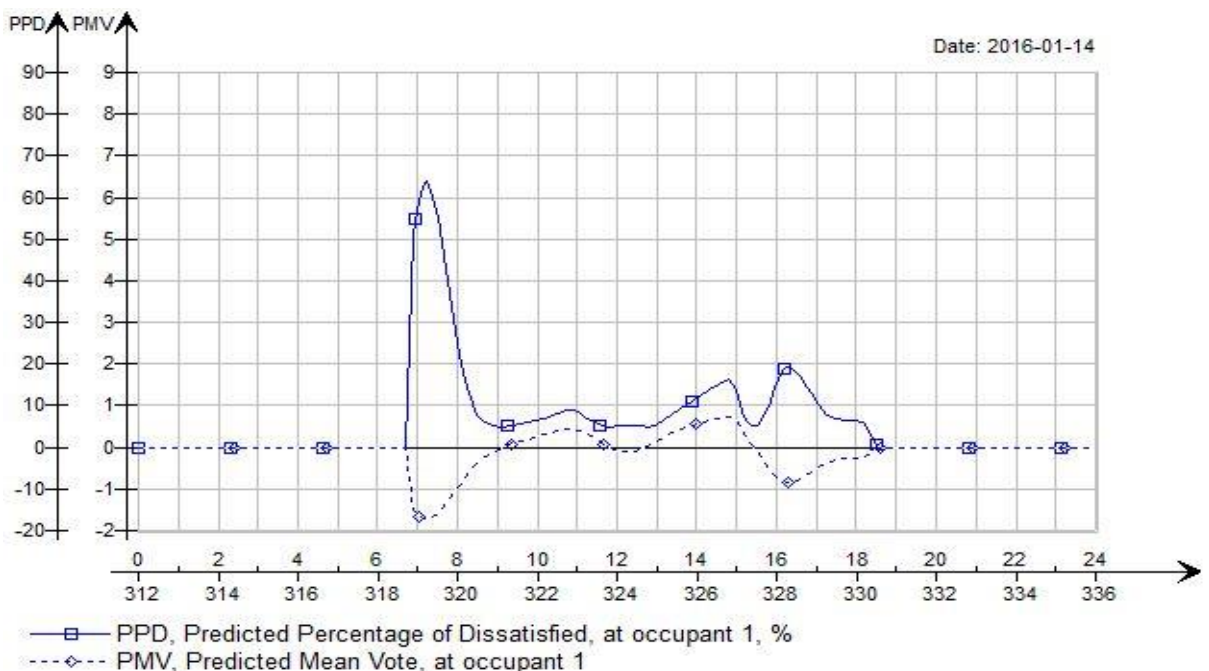
Figur 8.5: Luftkvalitet i nytt bygg med lufting tre gonger om dagen. IDA ICE.

8.1.3 PMV og PPD

Det interessante å sjå på Figur 8.6 og Figur 8.7, er at både i nytt og gammalt bygg, vil del misnøgde på starten av dagen vere svært høg. Det er simulert nærare 65 % misnøgde i det nye bygget, mot 55 % i det eldre klokka 07.00 om morgonen. Utover dagen vil dette stabilisere seg rundt 10 % for eldre bygg, og ned mot 8 % i nytt bygg. Middelvoteringa viser, at i den eldre bygningen vil dei fleste personane i rommet oppleve omgivnadane for kalde. I nytt bygg vil derimot temperaturen vere litt varm heile arbeidsdagen, bortsett frå i periodane etter lufting.



Figur 8.6: Misnøgde i kontorlandskap i eldre bygg ved lufting tre gonger. IDA ICE.



Figur 8.7: Misnøgde i kontorlandskap i nytt bygg ved lufting tre gonger. IDA ICE.

8.1.4 Oppsummering av simulering A

Resultata av denne simuleringa viste at det vil vere stor forskjell på korleis innemiljøet vert i det nye og det gamle bygget. Funna frå denne simuleringa er som fylgjer:

- Eldre bygg:
 - Temperatur mellom 17 °C og 20 °C. Tydeleg temperaturdropp klokka 07.00 og 16.00.
 - CO₂-konsentrasjon opptil 3000 ppm. Konsentrasjonen oppnår utekonsentrasjon i løpet av natta.
 - Under 10 % misnøgde i løpet av dagen, men opptil 55 % ved luftinga klokka 07.00.
 - Gjennom heile arbeidsdagen vil folk oppleve kontorlandskapet som litt kjølig.
- Nytt bygg:
 - Temperatur mellom 22 °C og 26 °C. Klokka 07.00 og 16.00 fell temperaturen signifikant.
 - CO₂-nivået ligg mellom 2500 og 4500 ppm heile dagen. Konsentrasjonen stig raskt frå arbeidsdagen startar og held seg høg.
 - Det vil vere under 10 % misnøgde mesteparten av dagen. Etter lufting klokka 07.00, vil det vere over 65 % misnøgde i ein kort periode.

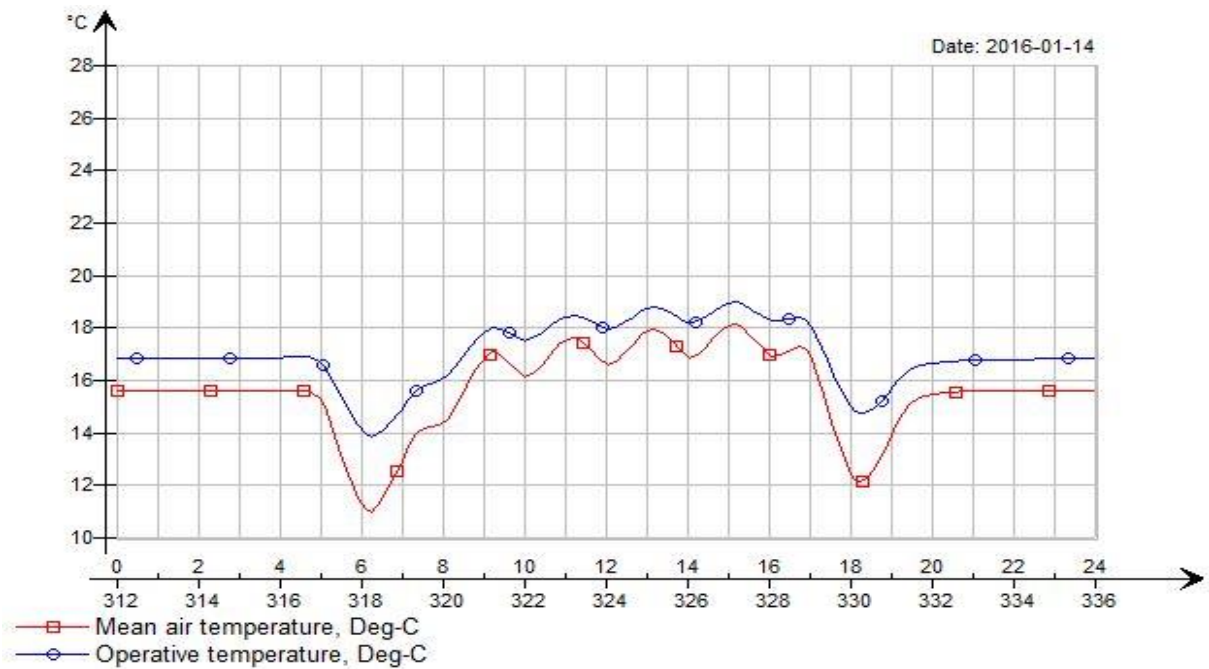
Luftestrategien med tre luftingar om dagen vil gje store temperatursvingingar utover dagen, og mange vil vere misnøgde når luftinga pågår. CO₂-konsentrasjonen er langt over anbefalte krav til innemiljø.

8.2 Simulering B

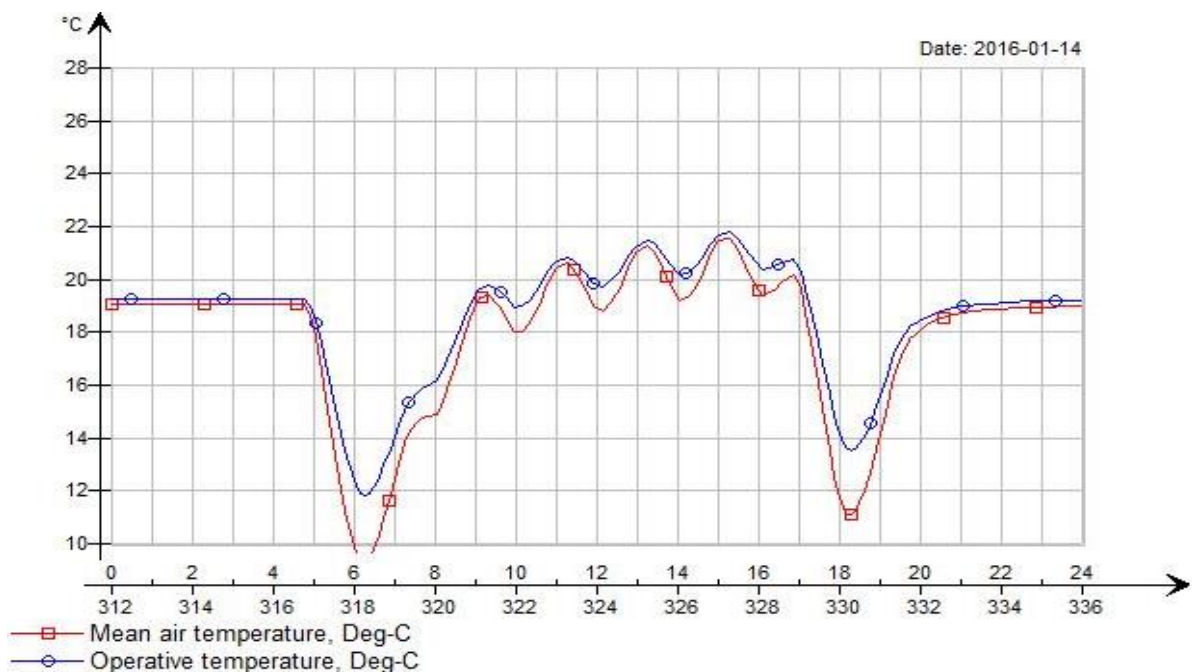
I denne strategien er det lagt inn to lengre lufteperiodar før og etter arbeidsdagen. Tanken bak er at temperaturen skal kunne stabilisere seg, før det kjem personar i kontorlandskapet, og for å unngå lang lufting i arbeidstida med mykje folk til stades. Annankvar time frå klokka 08.00 til klokka 16.00 er det lufting på tre minutt.

8.2.1 Temperatur

Ved lufting annankvar time vil temperaturen halde seg meir stabil gjennom dagen, samanlikna med resultat frå simulering A. Operativ temperatur søkk etter fyrste vindaugsluftinga, både for nytt og gammalt bygg, sjå Figur 8.8 og Figur 8.9. For eldre bygg vil den lågaste operative temperaturen felle til 14 °C, og for nytt bygg ned til 12 °C. Utover dagen vil temperaturen halde seg stabil i begge tilfella, høvesvis over/rundt 18 °C og 20 °C. Dette tyder på at personar som reiser på arbeid tidleg vil oppleve stor temperaturforskjell i løpet av dagen.



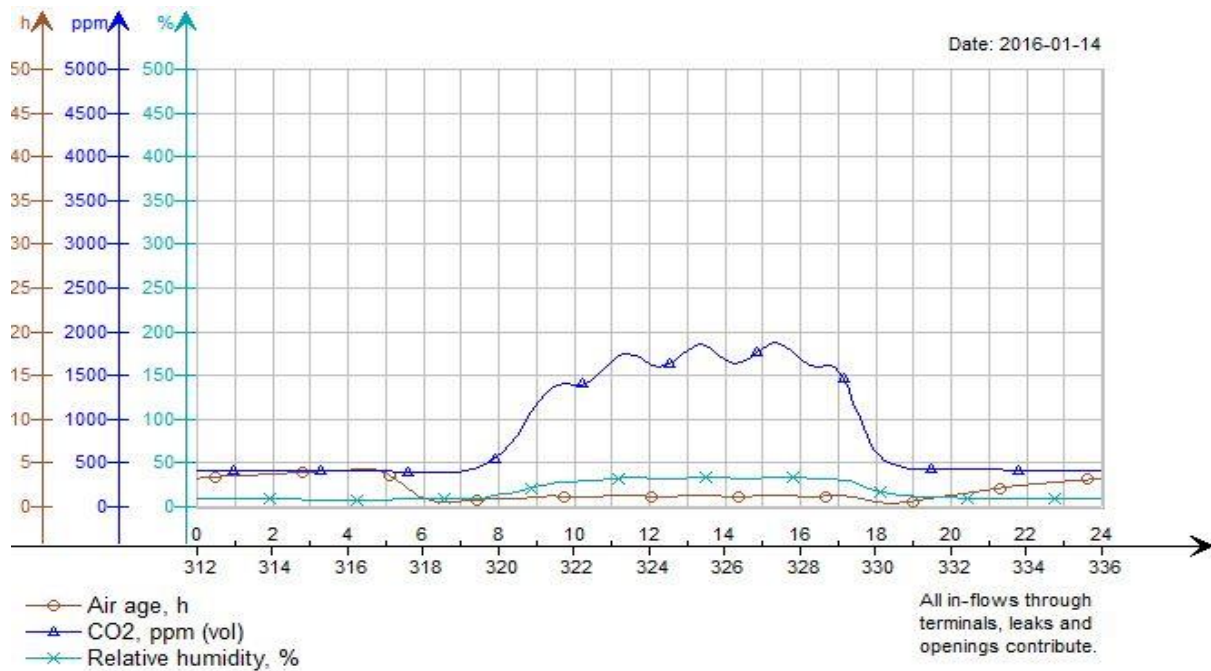
Figur 8.8: Temperatur i eldre bygning med lufting annankvar time. IDA ICE.



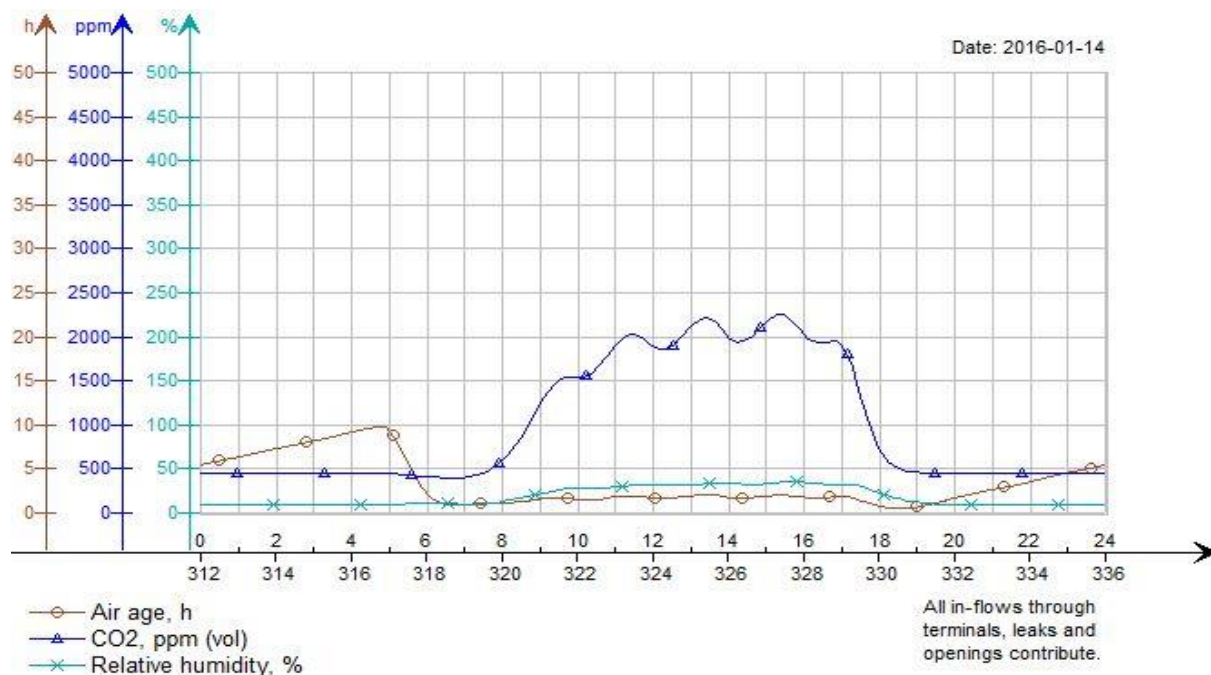
Figur 8.9: Temperatur i nyare bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.

8.2.2 Luftkvalitet

CO₂-konsentrasjonen vil vere høgare enn anbefalte nivå på 1000 ppm. I tilfelle med det eldre bygget vil CO₂-nivået stige utover dagen og stabilisere seg rundt 1750 ppm slik som grafen i Figur 8.10 viser. Det same gjeld for resultatata frå det nye bygget, men her vil høgaste CO₂-nivå stabilisere seg rundt 2250 ppm, sjå Figur 8.11. Alderen på lufta held seg stabilt lågt i begge tilfella.



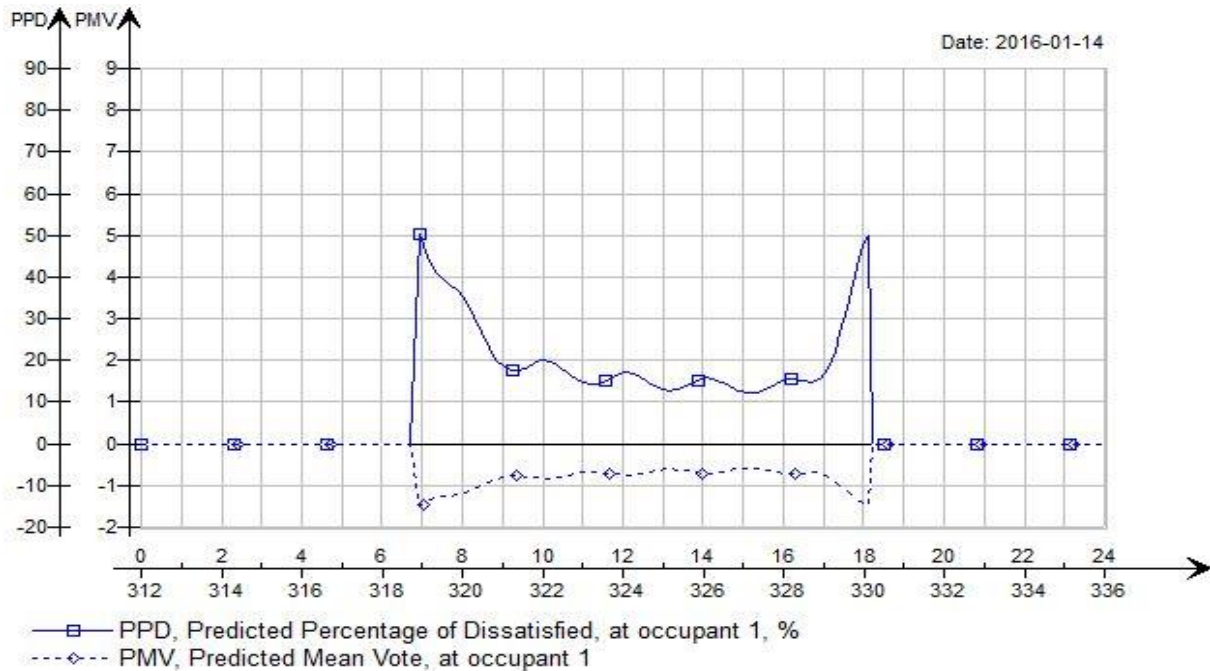
Figur 8.10: Luftkvalitet i eldre bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.



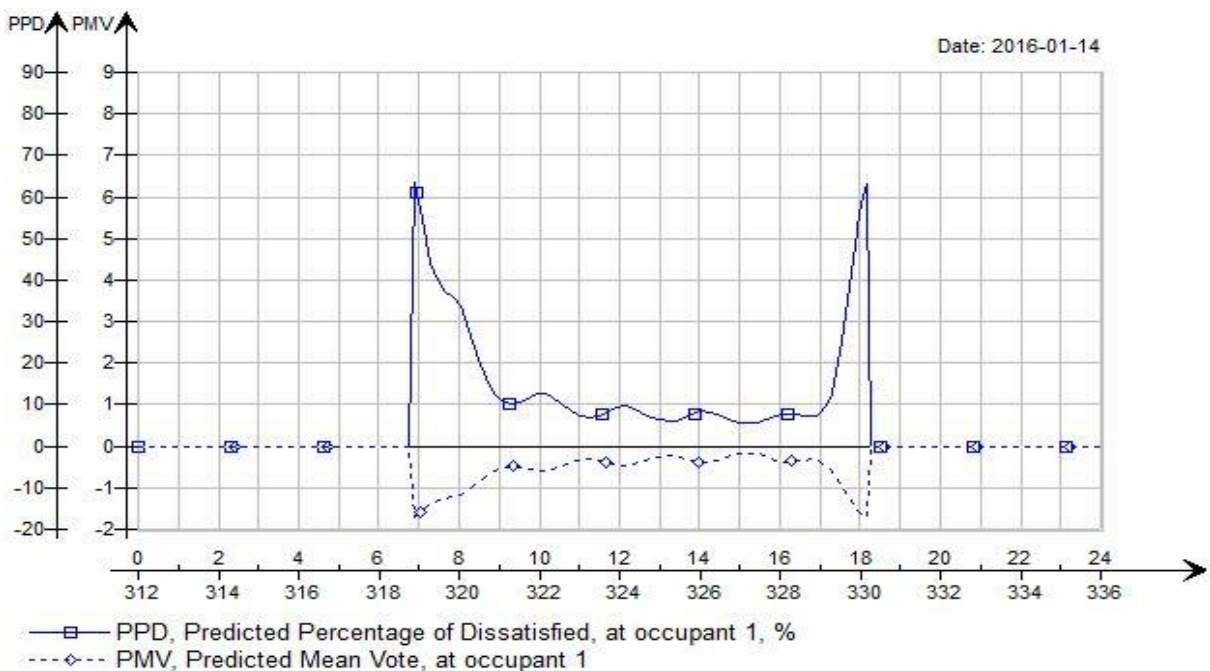
Figur 8.11: Luftkvalitet i nytt bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.

8.2.3 PMV og PPD

Når det kjem til prosentdel misnøgde ved lufting annankvar time er desse tala høgare enn for resultatata i simulering A. Dei høgaste toppane klokka 07.00 og 18.00 ligg på 50 % for gamalt bygg og 60 % for nytt bygg, høvesvis Figur 8.12 og Figur 8.13. Det må takast omsyn til at arbeidsdagen er sett frå 08.00 til 17.00, noko som gjer litt betre resultat for PPD. Gjennom dagen vil delen av misnøgde ligge på 15 % for gamalt bygg, medan det nye vil ha ein prosentdel på under 10 %. Den forventa middelvoteringa av opplevd temperatur, viser at det i begge bygningane vil følast kaldt.



Figur 8.12: Misnøgde i eldre bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.



Figur 8.13: Misnøgde i nytt bygg med lufting annankvar time. IDA ICE.

8.2.4 Oppsummering av simulering B

Simulering B viser at det med lufting annankvar time, vil gje meir stabile verdiar når det kjem til temperatur og CO₂-konsentrasjon. Resultata viser:

- Eldre bygg:
 - Operativ temperatur stabilt rundt 18 °C størsteparten av dagen. Luftingane klokka 06.00 og 18.00 vil senke temperaturen signifikant.
 - CO₂-nivå rundt 1750 ppm gjennom dagen. Luftinga klokka 18.00 gjer tilnærma lik utekonsentrasjon i rommet fram til neste arbeidsdag.
 - Rundt 15 % misnøgde gjennom dagen, med topp klokka 06.00 og 18.00 med 50 % misnøgde.
 - PMV som tilseier kjensle av kulde heile arbeidsdagen gjennom.
- Nytt bygg:
 - Utanom lufting klokka 06.00 og 18.00 vil temperaturen ligge stabilt over 20 °C.
 - Låge CO₂-konsentrasjonar over natta, men opptil 2250 ppm gjennom arbeidsdagen.
 - Høg prosentdel misnøgde rett etter lufting klokka 06.00 og 18.00, opp mot 60 %. Resten av dagen ligg det under 10 %.
 - Basert på forventa middelvoteringa, vil personar oppleve rommet litt kjølig heile dagen.

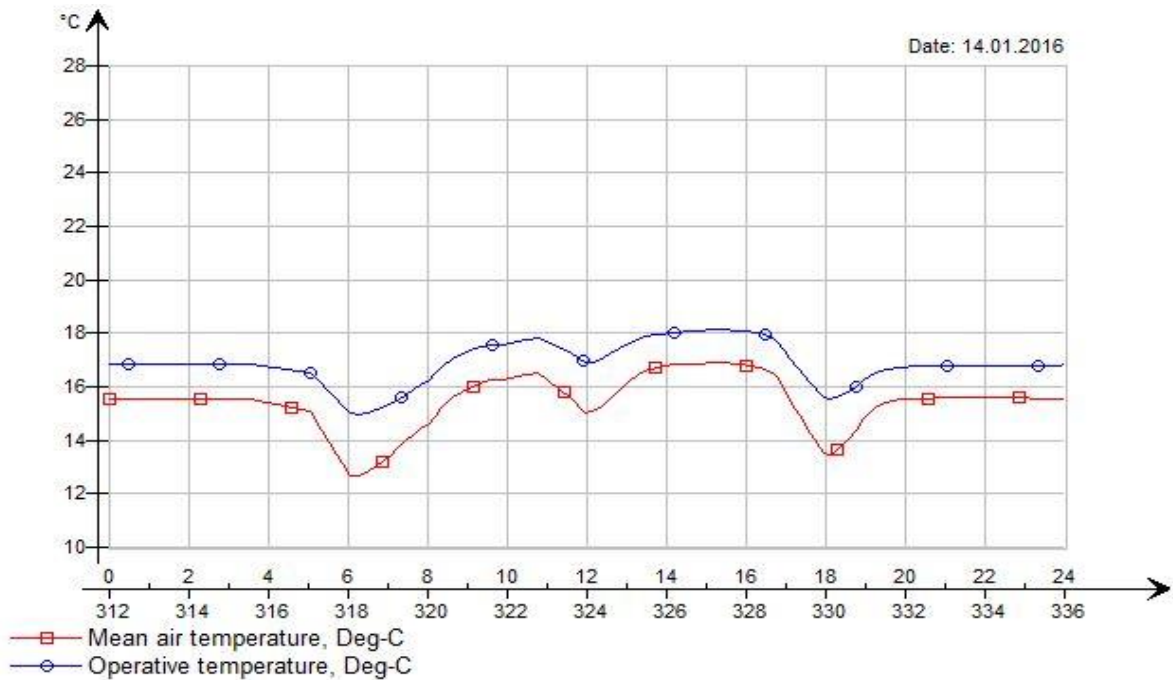
Strategien med lufting annankvar time vil gje relativt stabile temperaturar gjennom arbeidsdagen, med svingingar på rundt 1 °C. CO₂-nivåa er over anbefalte normer og luftkvaliteten vil oppfattast dårleg.

8.3 Simulering C

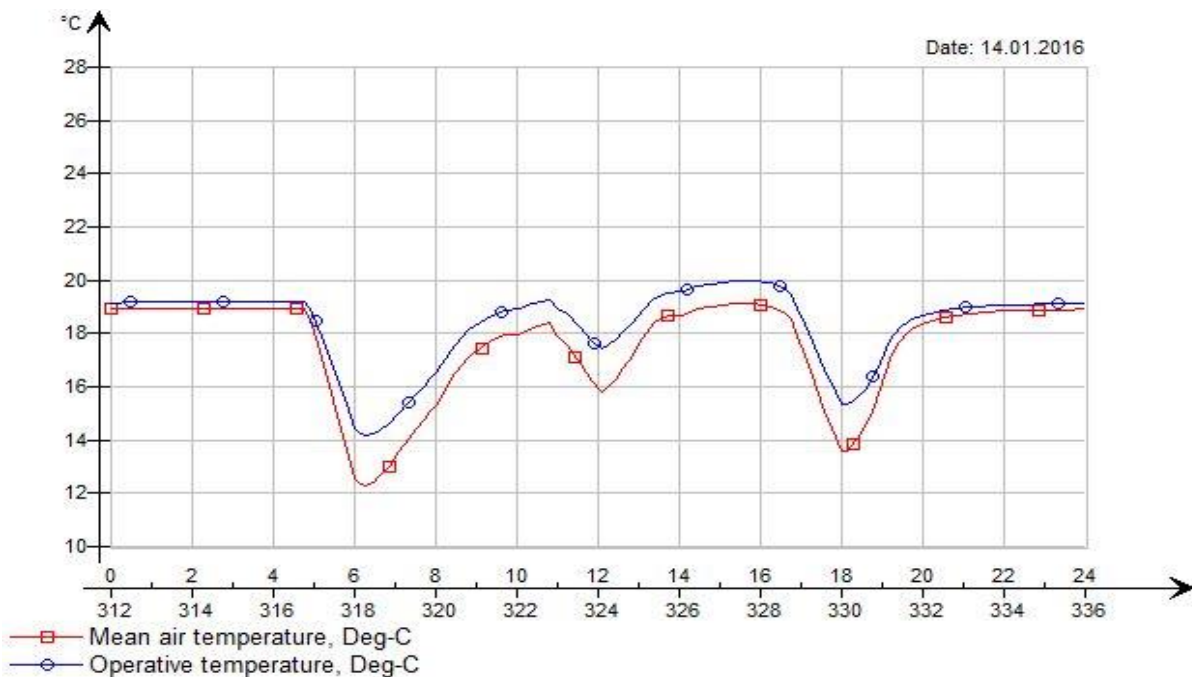
Simuleringa er gjennomført med luftestrategi med fem minutts vindaugslufting klokka 06.00, 12.00 og 18.00. Kvar heile time vert det lufta i to minutt. Korte lufteperiodar var valt for å vurdere om komfortkriteria kunne tilfredstillast med mange lufteperiodar, slik at temperaturen ikkje vart senka for mykje kvar gong.

8.3.1 Temperatur

Resultatet for temperatursimulering ved lufting kvar time er vist i Figur 8.14 og Figur 8.15. I den eldre bygningen er temperaturane lågare enn for dei to andre simuleringane, og gjennom dagen ligg den operative temperaturen mellom 17 °C og 18 °C. Temperaturen i nytt bygg er også redusert, og er i dette tilfellet mellom 18 °C og 20 °C mesteparten av dagen. På grunn av kortare luftperiode før og etter arbeidsdagen er ikkje operativ temperatur like låg klokka 06.00 og 18.00 som i dei andre simuleringane.



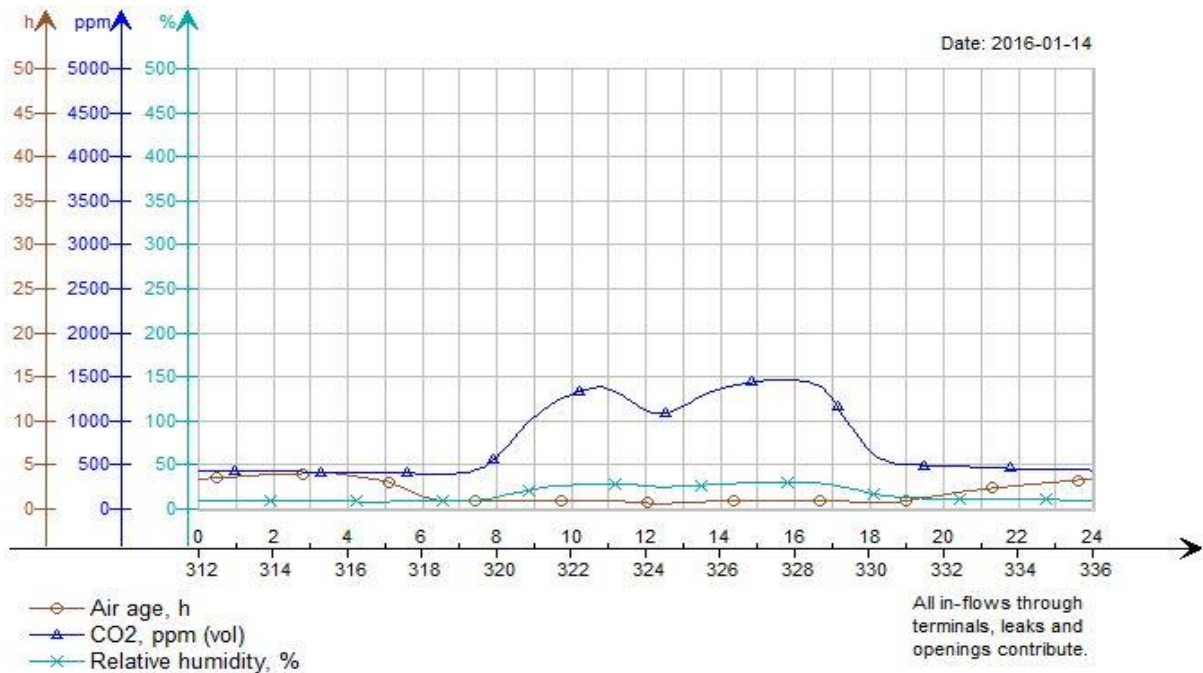
Figur 8.14: Temperatur i eldre bygg med lufting kvar time. IDA ICE.



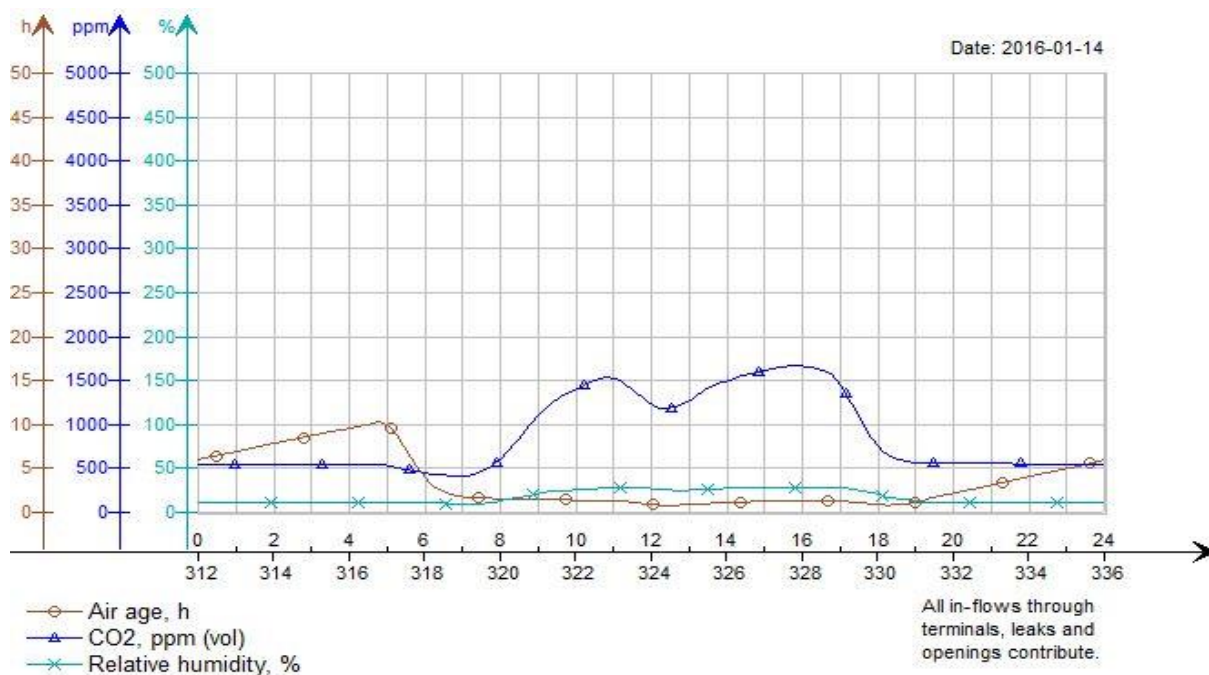
Figur 8.15: Temperatur i nytt bygg med lufting kvar time. IDA ICE.

8.3.2 Luftkvalitet

Når det vart lufta kvar time sank CO₂-konsentrasjonen betrakteleg samanlikna med simulering A. Det gamle bygget, vist i Figur 8.16, vil ha godt luftskifte og låg luftalder. CO₂-konsentrasjonen ligg mellom 1000 og 1500 ppm heile dagen gjennom. For det nye bygget, Figur 8.17, vil luftalderen derimot stige gjennom natta sidan det ikkje vart ventilert – men etter fyrste lufting på morgonen vil luftalderen verte redusert ned til under 1 time. For CO₂-nivået i nytt bygg vil det ligge rundt 1500 ppm heile dagen. Krava til inneklima vert ikkje tilfredsstilt.



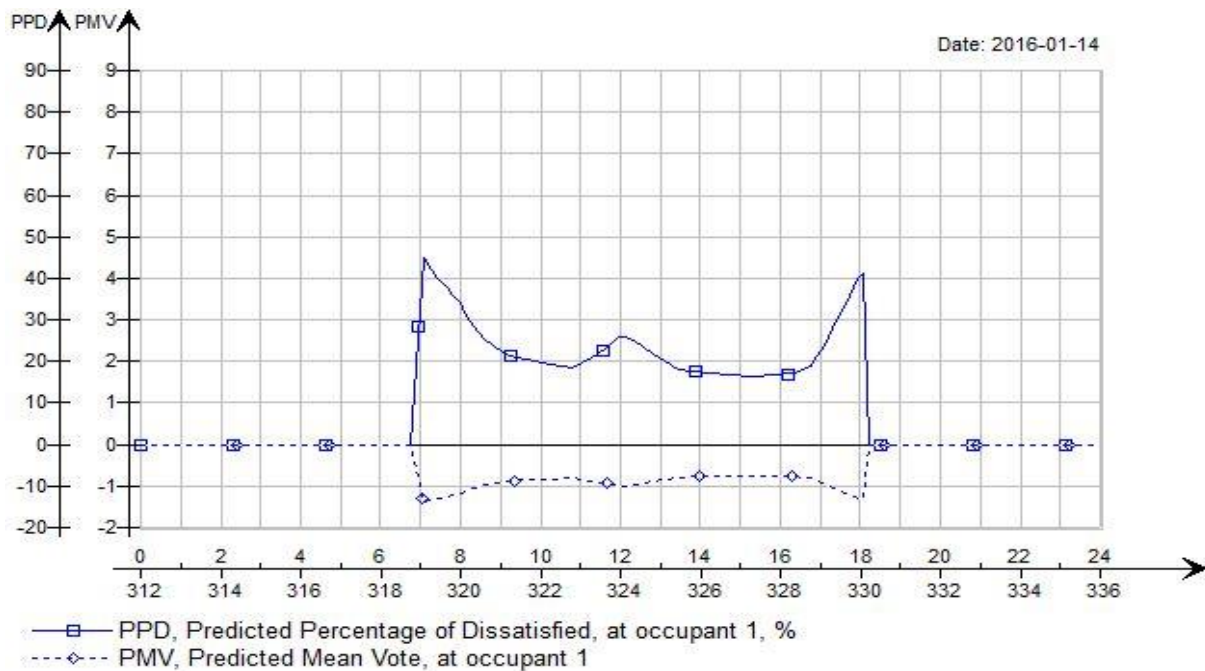
Figur 8.16: Luftkvalitet i eldre bygg med lufting kvar time. IDA ICE.



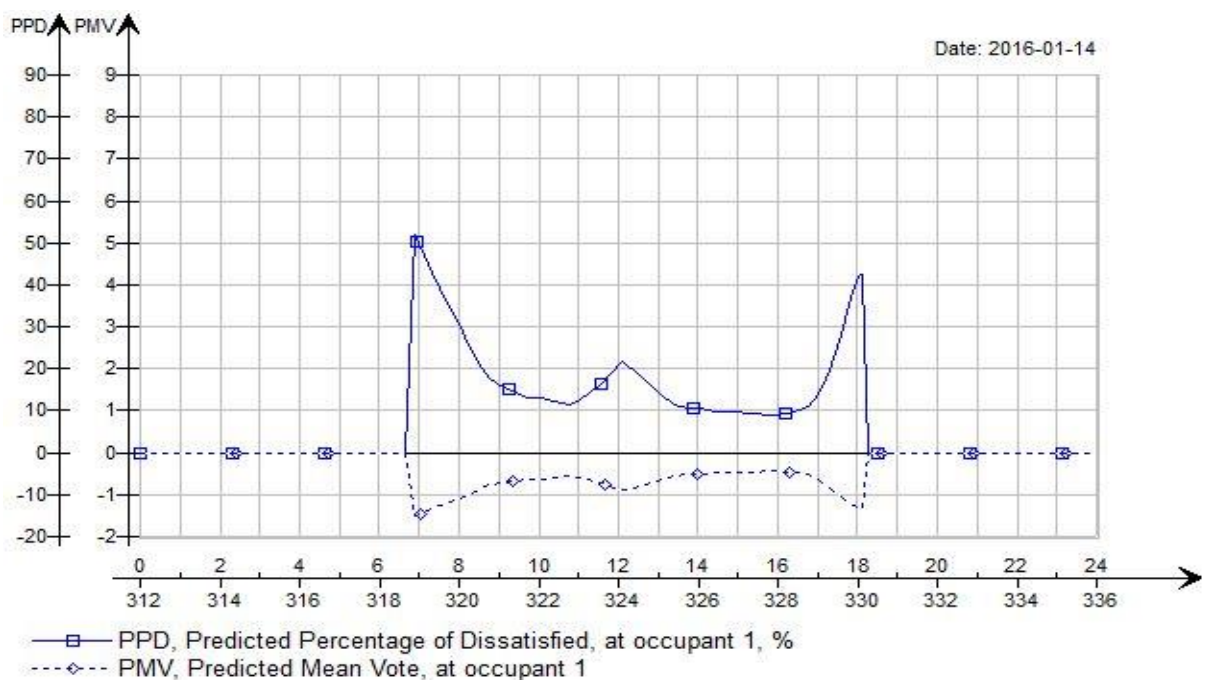
Figur 8.17: Luftkvalitet i nytt bygg med lufting kvar time. IDA ICE.

8.3.3 PMV og PPD

Ut frå Figur 8.18 og Figur 8.19, vert det observert at det i begge tilfella vil kontorlokalet opplevast som kjølig. Når det kjem til prosentdel misnøgde, er resultatata høgare i dette tilfellet enn for dei andre simuleringane. Grunnen for dette er høg hyppigheit av tilførsle av kjølig uteluft i opphaldssona. Det er også tydeleg at med fem minuttlufting klokka tolv gjer høgare del misnøgde, der det for eldre bygg når 25 % og nytt bygg opp til 20 %. Når det kjem til PPD er verdiane innanfor krava i tidsromma det berre er to minuttlufting. Ved lengre lufting klokka 06.00, 12.00 og 18.00 vert misnøya høgare.



Figur 8.18: Misnøgde i eldre bygg ved lufting kvar time. IDA ICE.



Figur 8.19: Misnøgde i nytt bygg med lufting kvar time. IDA ICE.

8.3.4 Oppsummering av simulering C

Resultata for simulering C med lufting ein gong i timen, har betre verdiar med tanke på CO₂-konsentrasjon enn dei tidlegare simuleringane. Derimot er temperaturane lågare enn tidlegare. Oppsummert viser resultata fylgjande:

- Eldre bygg:
 - Operativ temperatur mellom 17 °C og 18 °C.
 - CO₂-konsentrasjon varierende rundt 1000 til 1500 ppm gjennom dagen.
 - Forventa middelvotering viser at personar vil oppfatte rommet som kjølig.
 - Gjennom dagen vil det vere rundt 20 % misnøgde personar. Dette stig mot 40 % ved lufting klokka 06.00 og 18.00.
- Nytt bygg:
 - Operativ temperatur mellom 18 °C og 20 °C.
 - CO₂-konsentrasjon opp til 1500 ppm.
 - Prosentdel misnøgde er opp mot 50 % ved luftinga klokka 06.00 og 18.00. Resten av dagen ligg PPD mellom 10 og 20 %.
 - Basert på forventa middelvotering vil rommet opplevast kjølig.

Lufting kvar time vil gje betre CO₂-konsentrasjonar i begge bygga, men det er fortsatt over maksimumsgrensa på 1000 ppm. Temperaturen vil ikkje vere tilfredsstillande.

9. Diskusjon

I denne rapporten blir det sett på problemstillinga om naturleg ventilasjon kan tilfredsstille krav til termisk komfort ved låge utetemperaturar. Målingar og berekningar vart gjort, og det vart gjennomført inneklimasimuleringar i IDA ICE.

Ein studie av eksisterande kontorbygg med naturleg og hybrid ventilasjon vart gjort. Fellestrekk for bygga, presentert i 2.1.4, var store og opne kontorlandskap med god takhøgde. Luker og vindauger for lufting er strategisk plassert i yttervegg og er automatisk styrte etter inneklimate og vêrdata.

Bygg og vindaugstype

Den originale planen var å gjennomføre målingar i eit bygg med slik arkitektonisk framstilling. Det var difor tenkt å bruke NINA-huset i Trondheim, bygd i 2013. Grunna fleire uventa forhold som blant anna forseinka utstyr vart det ikkje mogeleg å utføre målingane der. I staden vart det målt i ein lesesal på Varmeteknisk laboratorium ved NTNU. Bytet av målebygg har påverka utfallet for oppgåva på fleire måtar. Dei planlagde målingane skulle gjerast på dagtid i NINA-huset slik at det var personar i lokalet under måling. Grunnen til dette var for å sjekke CO₂-konsentrasjonen gjennom dagen som fylgje av personbelastning. Det vart i staden gjennomført simuleringar for å undersøkje CO₂-konsentrasjonen.

Ein annan stor forskjell er at målingane vart gjennomført i Varmeteknisk, som har dårlegare byggtekniske faktorar enn NINA-huset. Korleis dette påverkar temperatur i bygget er også undersøkt i simuleringane. Ved same plassering i fasade og same vindaugstype vil hastigheita forventast å vere lik i begge bygga. Luftstrømsla i rommet kan derimot bli annleis viss vindauga er plassert djupt inn i fasaden, slik som det er gjort på NINA-huset sin sør- og vestfasade. Då kan det bli danna eit anna strøymingsmønster, noko som må undersøkjast vidare.

Den største forandringa var likevel type vindauger som vart testa. Dei opphavelige planane om å gjere forsøk på hastigheit i rommet med kontinuerleg lufting, med små vindauger høgt på fasaden, vart ikkje mogeleg. Kva dette i praksis vil seie for resultata er uvisst, men det kan til dømes tenkjast at strøymingsmønsteret hadde vore annleis. Korleis temperaturar og hastigheitar hadde blitt med høgt monterte vindauger, er derimot noko som må undersøkjast vidare. Vindauga som vart testa var plassert 0,9 meter opp frå golvet, og opna direkte til opphaldssoa. Som resultata frå målingane understreker vart det store hastigheitar rett innafor vindauga som fylgje av dette.

Gjennomførte målingar for sjokklufting vart gjort på eit topphengsla vindauger med vindaugsopning rundt 0,62 m². Frå Heiselberg et al. (2001) sin studie vart det konkludert med at under kalde forhold var botnhengsla vindauger montert høgt på veggen det beste alternativet. Bakgrunnen for det var at kald uteluft då ikkje vart tilført direkte i opphaldssoa, noko som forbetra dei termiske vilkåra. I studien vart det ikkje samanlikna med topphengsla vindauger, men med eit sidehengsla vindauger som har andre eigenskapar. Andre studiar har vist at topphengsla vindauger har dårlegare eigenskapar enn sidehengsla. Von Grabe et al. (2014) viste at topphengsla vindauger vil vere dårlegaste alternativ med tanke på ventilasjonsratar og fjerning

av CO₂. Roetzel et al. (2010) viste at sidehengsla vindaug kjem betre ut enn eit topphengsla vindaug med tanke på luftgjennomstrøyming. Ut frå dette kan ein trekke slutninga om at vindauga var dårleg eigna for naturleg ventilasjon. Dette gjeld både med tanke på plassering i fasaden og ventilasjonseigenskapar.

Målingar

I fleire av målingane frå kapittel 0 vart det observert hastigheitar opp mot 0,8 m/s tre meter inn i rommet. Det vart funne at hastigheita ved ankelhøgde var langt over krava i mange tilfelle, mens for hastigheit i hovudhøgde var noko betre. Når det kjem til temperatur vart det påvist at temperaturane var svært låge nær vindauga både med og utan oppvarming. I heile måleområdet oppstod det problem med stor temperaturgradient mellom anklar og hovud. Temperaturforskjellen mellom 0,1 og 1,1 meter var over dei anbefalte 4 °C frå NS-EN ISO 7730, med fleire målingar med over 6 °C forskjell. Under lufting vart altså krava for komfort i opphaldssoona ikkje tilfredsstilt, grunna lokal diskomfort.

Ei feilkjelde som kan ha påverka resultatane frå målingane, var mangel på vêrdata. Resultata er basert på gjennomsnittsverdien for kvart målepunkt. Frå gjennomsnitta vart det avdekka store standardavvik for hastigheit, noko som viser til store fluktuasjonar i vindhastigheita. Dette viser dermed at dei målte hastigheitene burde vore sortert ut frå vindhastigheit. Det hadde då vore mogeleg å lage hastigheitsprofilar for ulike vindhastigheitar. Desse kunne då brukast til å vurdere om det kan luftast ved lågare hastigheitar, utan at det får konsekvensar for den termiske komforten til brukarane. Viss det er tilfelle, sjølv ved kalde utetemperaturar, kunne det lagast styringssystem for vindauga der komfortkriteria fortsatt vert tilfredsstilt. Eit slikt tilfelle kan tenkjast at det kan brukast i eit hybrid system saman med mekanisk ventilasjon, der det vert lufta med låge vindhastigheitar.

Sjølv om resultatane ikkje er sortert etter vêrdata vil gjennomsnittsverdien likevel gje ein peikepinn på korleis lufttrøslene vil bli inne i rommet. Saman med standardavviket for målingane hadde det vore mogeleg å luke ut eventuelle avvik. Standardavvik for temperatur og andre hastigheitar vart ikkje behandla grunna mangel på tid. I vidareføring av dei funne resultatane burde standardavvik bli gjennomgått for alle målingar. I staden for å sortere etter vêrdata, kunne dei største avvika bli fjerna ved analyse av standardavvik for målingane.

I etterkant av målingane vart det funne fleire feilkjelder som kan ha påverka resultatane. Det vert antekent at systematiske feil, forklart i avsnitt 0, er lukt ut. Risiko for at det er gjort feil under behandling av måledata er til stades. Mykje data har blitt gjennomgått, og det kan ha oppstått feil under innsamling og samanlikning av data. Den største kjelda til feil var forventninga å kome av direkte feil tal henta frå Excel.

Utstyret vart prøvd ut før dei skikkelege målingane starta, og metodefeil vart på den måten minimert etter beste evne. Det same gjeld for instrumentfeil, der kalibrering av utstyret har fjerna dei største avvika. Det vil likevel alltid vere eit visst avvik knytt til utstyret som ikkje kan fjernast. Dette avviket kan ha mykje å seie, spesielt for nokon av hastigheitsmålarane som kan ha avvik opp til 0,1 m/s ved høge hastigheitar. Sidan alle målingar for temperatur og hastigheit vart logga digitalt vart risikoen for grove feil redusert betrakteleg.

Ei feilkjelde som oppstod under målingane var at riggen alltid vart flytta i stigande rekkefylgje frå 0,5 meter til 3,0 meter. Korleis det vil påverke resultatet er uvisst. Grunnen til at det skal gjerast i tilfeldig rekkefylgje er for å unngå at ein gjentakande feil førekjem på same stad gong etter gong. Dersom ein gjentakande feil kjem ulike plasser, vil det vere mogeleg å plukke ut avvik frå resultatata. I dette tilfellet med at riggen er flytta i lik rekkefylgje kvar gong har relativt liten risiko for å utgjere store feil. Det er fordi målingane gjeld for hastigheit i rommet, som er sterkt knytt til vindhastigheita. Fluktuasjonar i vinden vil oppstå uavhengig av rekkefylgja på målingane. Temperaturane kan derimot ha blitt påverka, fordi temperaturen kan ha stabilisert seg frå starten til slutten av luftinga. I etterkant ser ein at dette burde vore gjennomført annleis i forsøket.

Når det gjeld kontorpultane som stod i vegen for visse målingar var dette ei feilkjelde som klart påverka resultatata. Dette gjeld resultatata for målingar 1,5 meter og 2,5 meter ut langs veggen. Det er forventa å ha betydingsfull innverknad på resultatata, spesielt når det kjem til målte verdiar for hastigheit. Dette er fordi kontorpultane og skiljevæggen på toppen av pulten vil stogge mykje av luftstraumane i området. Spørsmålet som reiser seg til denne feilkjelda er kor mykje den eigentleg vil ha å seie. Samanlikna med eit tomt rom vil det ha stor innverknad. Ser ein derimot på kontorlandskap vil det ikkje ha same påverknad, sidan dette er ei typisk møblering i dagens planløyising.

Berekningar

Berekningar understøtta funna i målingane, då det vart gjort analyse på misnøgde grunna trekk og temperaturforskjell. På grunn av trekk var det i visse tilfelle over 100 % misnøgde, og ein ser ikkje nokon samanheng om det gjeld for tilfelle med eller utan oppvarming. Det betyr at sjølv om radiatoren reduserte noko av hastigheita i målingane, var det ikkje nok til å senke prosentdel misnøgde grunna trekk. Det kan tyde på at radiatoren ikkje leverte høg nok effekt til å forhindre trekk langs golvet.

Utrekning av misnøgde grunna temperaturforskjell mellom ankel og hovud viste derimot at oppvarming kan redusere prosentdel misnøgde. Det vart påvist klar reduksjon i misnøgde under analyse av data som gjeld frå midten av vindauga inn i rommet. For resultatata frå kanten av vindauga og innover i rommet, auka derimot prosentdel misnøgde for målingane med radiator. Logisk sett var det forventa at med oppvarming, ville tal misnøgde grunna temperaturforskjell bli redusert. Dette kan sjåast i samanheng med at måledataa ikkje er sortert etter utetemperatur, noko som gjer til at det er forskjell mellom dei temperaturane som er brukt i berekningane.

Me ser frå Tabell 6.2 at temperaturen ved ankelhøgde faktisk er lågare med oppvarming, enn utan. Det viser tilbake til avviket som vart funne i avsnitt 5.2.2, der det ikkje var noko samanheng mellom snittet 0,5 meter frå vindauga utan radiator og dei andre resultatata. Dette snittet mangla det karakteristiske kuldeområdet som i dei andre tilfella var tydelege rundt 1 til 1,5 meter. Analyse av målte data og standardavvik, viste at den aktuelle målinga ikkje hadde like høg hastigheit. Det kan tyde på at det var lågare hastigheitar når målinga føregjekk enn ved dei andre målingane. Mangelen på det kalde området som vart skapa ved høg hastigheit førte dermed til at det var mindre misnøgde utan enn med oppvarming. Resultat knytt til snittet ved kanten av vindauga utan oppvarming er difor misvisande samanlikna med andre resultat der

hastigheita var høgare. Denne målinga burde vore gjennomgått for å fjerne avvik, noko som kunne ha forbetra resultatet.

Ei anna feilkjelde som viste seg under desse berekningane var lengde på målingane. Målingar på 45 sekund vart brukt for berekning gjennomsnittshastigheit og standardavvik. Normalt sett skulle desse målingane vore over tre minutt, men det har ikkje blitt gjennomført så lange målingar på kvart punkt. Grunnen til at det ikkje var lengre målingar var for å få tid til å logge i alle avstandar frå veggjen under korte periodar med sjokklufting. Sidan vinden fluktuerte heile tida er det likevel mogeleg å plukke opp desse endringane, sjølv ved kort måleperiode. Ideelt sett burde målingane gått over tre minutt.

Likning (2.6), som vart nytta til berekning av DR, er gyldig for lokal lufttemperatur mellom 20 °C og 26 °C. Temperaturane som vart nytta til utrekning av DR var alle godt under 20 °C, noko som kan føre med seg større usikkerheit rundt resultatane. Gyldig grense for hastigheit er under 0,5 m/s, noko alle dei målte hastigheitene overskrider. På grunn av dei høge hastigheitene er det uansett forventa høge tal av misnøgd grunna trekk, og det vart ikkje teke noko meir omsyn til feilkjelda.

For å oppnå krava til TEK10 må tilført luftmengd i kontorlandskapet vere over 1260 m³/t. Ved berekning av luftmengder frå dei matematiske modellane vart det oppdaga stor forskjell mellom De Gids og Phaffs metode, Warrens metode og Larsen og Heiselbergs metode. Det var svært varierende resultat i Warrens metode, då resultatane var mykje lågare enn i dei to andre. Grunnen for dette er at Warrens metode ikkje tek omsyn til termisk oppdrift, noko som vil ha stor betydning grunna stor temperaturforskjell mellom inne- og utelufta. Det som viser seg frå resultatane er at metoden til Larsen og Heiselberg faktisk har høgare luftmengder ved 1 m/s og 5 m/s, enn ved 3 m/s. Altså svingar luftmengda fordi den både tek omsyn til temperatur, innfallsvinkel og hastigheit.

De Gids og Phaffs metode viste mindre forskjell frå Larsen og Heiselbergs metode enn det som var forventa. Sidan sistnemnte også tek omsyn til innfallsvinkel av vinden, var det i forkant forventa høgare verdiar for Larsen og Heiselbergs metode. Grunnen til at det ikkje var større forskjell kom av at vindauga ligg på lesida av bygget. Det betyr at innfallsvinkelen i dette tilfellet vil ha lite å seie i Larsen og Heiselbergs metode. Viss vindauga derimot hadde vore på vindsida ville luftmengdene vore større. I ein slik situasjon ville det også blitt høgare hastigheitar i rommet og kald luft ville spreidd seg meir.

I berekning av luftmengde vart det gjort tilnærmingar for fleire verdiar. Spesielt gjaldt dette parameterar med tilknytning til innfallsvinkel i Larsen og Heiselbergs metode. For innfallsvinkelen vart det teke utgangspunkt i normal vindretning i Trondheim, som er sør-sørvest. Vinkelen skulle eigentleg vore berekna ut frå normalvinkelen på vindauga, men dette vart oppdaga i etterkant. Korrigering av dette vart ikkje gjort, men uansett vil verdiane vere rundt dei same fordi vindauga ligg på lesida. Vindretning vil difor ikkje ha særleg stor innverknad på den berekna luftmengda. På bakgrunn av dette er det retta noko usikkerheit til luftmengdene berekna frå Larsen og Heiselbergs metode.

Dei berekna luftmengdene gjeld viss det vert kontinuerleg lufta og luftmengdene i TEK10 vert då tilfredsstilt. Men sidan luftinga derimot gjeld i korte periodar var det naudsynt med vidare analyse av luftmengdene. Det vart funne at for å oppnå krava til TEK10 må det luftast med alle vindauga i 23 minutt per time. Samanlikna med målingane og funna for termisk komfort er det ikkje mogeleg å tilfredsstille krava til luftmengder og termisk komfort ved bruk av naturleg ventilasjon.

Simuleringar

Simuleringane i IDA ICE vart gjennomført for å undersøkje korleis CO₂-konsentrasjonen ville bli med sjokklufting. Tre simuleringar vart gjennomført med ulike strategiar for lufting. Simuleringane vart gjort utan oppvarming i rommet, noko som påverkar resultatet. Resultata frå simuleringa var eintydig slik som for målingane. Det var registrert låge temperaturar i opphaldssoona og dei termiske krava vart ikkje tilfredsstilt. Dette gjaldt spesielt i det eldre bygget der den operative temperaturen i alle simuleringane låg mellom 18 °C og 20 °C i arbeidstida. Me ser også at temperaturane for nytt bygg til dels klarar temperaturkrava, avhengig av kor ofte det vert lufta. I dei tre simuleringane er det tydeleg at temperaturen fell ved lufting før og etter arbeidsdagen. Kor fort temperaturen stig att etter lufting er uvisst og bør undersøkjast vidare.

Ved nærare analyse av simuleringresultata, vart det oppdaga at ved fyrste lufting om morgonen vil temperaturen i nytt bygg felle meir enn i det eldre bygget. Dette var noko overraskande sidan det var simulert for lik utetemperatur og opningstid av vindauga. Grunnen til denne skilnaden vart funnen til å vere at det er høgare temperatur natta gjennom i det nye bygget. Når temperaturforskjellen vert større vil den termisk oppdrifta ha større innverknad. Dette funnet er ikkje vidare undersøkt, men kan samanliknast med berekning av luftmengder, der termisk oppdrift vart funne til å ha stor påverknad ved kalde temperaturar.

CO₂-nivået i simuleringane, både for nytt og gamalt bygg, var svært høge. I simulering A var konsentrasjonen svært høg; over 3000 ppm i det eldre bygget og 4500 ppm i det nye. Så høg CO₂-konsentrasjon vil ha innverknad på arbeidsprestasjonen, som vist i studien til Satish (2014). I dei to andre simuleringane med oftare lufting, vart CO₂-konsentrasjonen forbetra. Likevel var det ikkje nok for å nå kravet om CO₂-nivå under 1000 ppm i kontorlandskap og vil påverke arbeidsprestasjonen til personar i lokalet.

Ein annan sak frå simuleringresultata vart funne ved samanlikning av Simulering B og Simulering C. I simulering B er det eit tydeleg dropp i grafane annankvar time, altså der det vart lufta. Det finst ikkje noko slik tendens i simulering C, sjølv om det vert lufta kvar time. Temperaurane og CO₂-konsentrasjonen er redusert samanlikna med simulering B. Det tyder på at sjølv om det ikkje er tydeleg i grafen vil oftare lufting ha innverknad på innklimaet. Som det kjem fram frå simulering C med lufting kvar time nærmar CO₂-konsentrasjonen seg tillatne nivå. Det viser at ved rett luftestrategi vil CO₂-konsentrasjonen kunne reduserast til tilfredsstillande nivå.

Frå simuleringa er det visse feilkjelder som vil påverke resultata. For det fyrste kan dei nærliggjande sonene ha innverknad på temperaturen i sone 1. Dette er fordi dei andre sonene har stabil temperatur mellom 21 °C og 25 °C, og ofte var høgare enn temperaturen i sone 1. Ein

anna påverkande faktor var lengda på tidsintervall for simulering. I etterkant vart det oppdaga at simuleringane burde vore kjørt med kortare intervall, noko som ville gjort resultatane meir nøyaktige. Til dømes har dette ført til at grafen for temperatur fell nedover *for* vindauga faktisk vart opna for lufting. Ved kortare tidsintervall ville difor temperaturen minke på det klokkeslettet det vart lufta.

Det vart ikkje teke omsyn til personar som er på arbeid før og etter driftstida, altså mellom klokka 17.00-08.00. Viss det er personar i lokalet utanfor det tidsrommet vil det påverke både temperatur og CO₂-konsentrasjon. Dette bør undersøkjast vidare for blant anna om det må leggjast inn lufterperiode seinare på kvelden for å unngå høge CO₂-nivå. Frå IDA ICE er det teke utgangspunkt i den operative temperaturen som gjeld for heile kontorlandskapet. Ideelt sett burde det vore utført ein analyse av temperaturfordelinga i rommet, spesielt med tanke på om det akkumulerer seg varm luft ved taket og djupt inne i rommet.

Naturleg ventilasjon i kontorlandskap

Eit spørsmål som reiste seg etter gjennomgang av resultatane var kor lenge det er mogeleg å opphalde seg i kalde temperaturar med høge lufthastigheitar. Som nemnt gjeld alle målingane berre når det vart lufta, og det er då interessant å sjå vidare på kva som skjer etter vindauga vert lukka. Normalt vil ein gå ut frå at det ikkje er andre bevegelsar i lufta enn det som vert danna av personar i rørsle, dører og liknande. Vidare undersøkingar på korleis temperaturen i rommet vil arte seg etter at vindauga er lukka kan vere interessant. Viser det seg at temperaturen stabiliserer seg raskt på grunn av til dømes termisk masse eller stort luftvolum, vil det vere mogeleg å utarbeide metodar for i korte ned den kjølige perioden i rommet. Dette vil vere svært avhengig av kor fort temperaturen stig, etter at det er tilført kald luft i rommet.

Viser det seg at temperaturen stig raskt til godkjente nivå, er då spørsmålet om personar i rommet vil tillate korte periodar med trekk og lågare temperaturar. Som Valančius og Jurelionis (2013) viste, vil temperaturreduksjon gje betre arbeidsprestasjon. Det må takast i betraktning at temperaturen i forsøket vart redusert sakte, med 0,1 °C i minuttet, og at dette gjaldt korte forsøk på under to timar. Ved så stor temperaturforskjell som målingane viste, kombinert med at det må luftast opptil fleire gonger i timen, kan det derimot ikkje anbefalast å arbeide i eit slikt inneklima.

Vidare undersøkingar bør også gjerast på korleis romhøgda har innverknad på CO₂-konsentrasjon i opphaldssona. Ved god takhøgde har CO₂ og forureina luft moglegheita å akkumulere over opphaldssona, og det kan luftast ved sjeldnare tidspunkt. I ein slik situasjon kunne det tenkjast at temperaturen i rommet kan bli tilfredsstillande. Eit stort luftvolum kan også hindre store svingingar i temperatur gjennom dagen. Ei hake med dette tilfellet er korleis lukene eller vindauge skal plasserast, og om til dømes ein-sidig eller kryssventilasjon kan vere eit godt alternativ.

Som alle resultatane viser vil det vere vanskeleg å oppnå godt inneklima med dei faktorane som ligg til grunn i forsøket. Noko av dette vil kunne forberast med godt prosjektert oppvarming, men det kjem likevel til å bli problematisk å oppfylle krava til termisk komfort, CO₂ og luftmengder samtidig. For å tilfredstille krava til luftmengder vil det krevje store vindauge. Det

vil føre til problem med temperatur og hastighet på grunn av høgt luftskifte under luftinga. Til slutt er det spørsmålet om kor mykje energi som går med til oppvarming av lokalet på vinterstid ved sjokklufting, samanlikna med mekanisk ventilasjon med varmeattvinning.

10. Konklusjon

Problemstillinga i denne rapporten har vore å vurdere om kriteria til komfort kan tilfredsstillast i store kontorlandskap når naturleg ventilasjon vert nytta ved kalde utetemperaturar. Det vart gjennomført målingar på lufthastigheit og temperatur, i eit kontorlandskap på 184 m², i eit eldre bygg.

- Det vart testa sjokklufting gjennom eit topphengsla vindauge med storleik 1,048 · 1,011 meter og vindaugsopning rundt 0,62 m² under forsøka. Under målingane låg utetemperaturen mellom 0 og 5,5 °C. I det verste tilfellet vart det målt lufthastigheitar opp mot 1,1 m/s, og temperaturar ned mot 13 °C. Under lufting vart ikkje krava for komfort i NS-EN ISO 7730 oppfylt. Dette tilseier at det ikkje er mogeleg å bruke topphengsla vindauge i den størrelsen ved naturleg ventilasjon i kaldt klima.
- Simuleringar av ulike tidsplanar for lufting vart utført for både eit eldre og eit nytt bygg. Fellestrekk for resultatane var at med rett planlegging kan det nye bygget tilfredsstillast krava til temperatur og det eldre bygget krava for CO₂. Hindringa vert derimot at det eldre bygget til tider vil få svært låge innetemperatur og det nye bygget kan ha stor risiko for høge CO₂-nivå.
- Med bakgrunn i målet om å redusere energibruk bør det gjerast ei analyse av naturleg ventilasjon samanlikna med mekanisk ventilasjon. På vinterstid vil det vere stort behov for oppvarming i kontorlokala sidan det vert tilført kald uteluft direkte inn i rommet. Dette må sjåast i samanheng med energibruk til mekanisk ventilasjon, og kva for alternativ som gjennom året vil forbruke minst energi.

Det kan konkluderast med at sjokklufting ved store vindauge og utetemperaturar lågare enn 5 °C ikkje kan anbefalast. Termisk komfort, CO₂ og luftmengder vil ikkje samtidig kunne tilfredsstillast dagens krav, men det er mogeleg kvar for seg.

11. Vidare arbeid

Modellen i IDA ICE må utbetrast ved å legge til oppvarming. Den nye modellen bør brukast til å undersøkje om temperaturen vil halde seg innanfor krava til NS-EN ISO 7730, når det vert lufta oftare. Det er naudsynt å senke CO₂-nivået, og det må utarbeidast ein ny luftestrategi for å få ned konsentrasjonen, slik at temperaturen samtidig er tilfredsstillande.

Simuleringane i IDA ICE bør også kjørast med kortare tidsintervall for å få meir nøyaktige resultat. På bakgrunn av desse resultatane kan det gjerast ei vurdering på om temperaturen stig raskt til nivå som tilfredsstillar komfortkrava. Dette må også sjåast i samanheng med om det er mogeleg å arbeide ved slike temperaturar.

Vidare behandling av målingane er også naudsynt. Det må takast omsyn til standardavvik og eventuelt fjerne avvik i målingane for å oppnå meir nøyaktige resultat.

Djupe rom med store romvolum kan vere ein mogelegheit for å unngå temperaturproblematikken. Kryssventilasjon, og naturleg ventilasjon med oppdrift gjennom trappesjakter, er noko som bør undersøkjast vidare. Spesielt bør det gjerast forsøk i rom med god takhøgde for å undersøkje om CO₂-nivået i opphaldssona kan bli tilfredsstillande.

For å forbetre dei termiske omgivingane vart det påvist at det må vere oppvarming i lokalet for å heve temperaturen. Vidare må det difor gjennomførast ein analyse på kor mykje dette vil påverke bygget sitt totale energibruk. Det er naudsynt med ei vurdering på om det er lønsamt å bruke energi på oppvarming av kjølig uteluft. Vidare må det samanliknast med kor stort energibruk som eventuelt ville gått til oppvarming og drift ved mekanisk ventilasjon.

For at det skal vere mogeleg å bruke naturleg ventilasjon i kontorbygg må det lagast nye krav til inn klima i naturleg ventilerte bygg. Blant anna må det vere definert kor lenge det kan luftast gjennom dagen utan at det påverkar arbeidsprestasjonen. Kor hyppig det kan luftast er også noko som må avklarast for å unngå store temperatursvingingar gjennom dagen.

Referansar

- AALBORG UNIVERSITET. 2008. *B&O's hovedkvarter i Struer* [Online]. Tilgjengeleg frå: <http://www.indeklima.aau.dk/bo.htm> [Lest 04.juni 2016].
- ALLARD, F., ALVAREZ, S., SANTAMOURIS, M. og ALTENER, P. 1998. *Natural ventilation in buildings: a design handbook*, London, James & James.
- ANDA, P. 2015a. *Kontorbygg i passivhusstandard med dekker av massivtre* [Online]. Norske arkitekters landsforbund. Tilgjengeleg frå: <http://arkitektur.no/nina-hovedkontor?leid=1033&pid1=228526> [Lest 02.mars 2016].
- ANDA, P. 2015b. *NINA hovedkontor* [Online]. Trefokus. Tilgjengeleg frå: <http://www.trefokus.no/OdataProjectDetails.aspx?m=1704&prjID=246939&nid=229031&type=ProjectTypes#ad-image-0> [Lest 18.februar 2016].
- ARBEIDSTILSYNET 2013a. *Arbeidsplassforskriften: Forskrift om utforming og innretting av arbeidsplasser og arbeidslokaler*. 2016 utg. Direktoratet for arbeidstilsynet, Trondheim.
- ARBEIDSTILSYNET 2013b. *Forskrift om Tiltaks- og grenseverdier*. 2015 utg. Østfold Trykkeri AS.
- ARBEIDSTILSYNET. 2013c. *Veiledning om klima og luftkvalitet på arbeidsplassen* [Online]. Tilgjengeleg frå: <http://www.arbeidstilsynet.no/binfil/download2.php?tid=79437> [Lest 02.mars 2016].
- ARC ARKITEKTER. 2015. *Vestre Kanalkai 20 (2014)* [Online]. Tilgjengeleg frå: <http://www.arcarkitekter.no/index.php/vestre-kanalkai-20-2014> [Lest 15.april 2016].
- AWBI, H. B. 2003. *Ventilation of buildings*, London, Taylor & Francis.
- AWBI, H. B. 2008. *Ventilation systems: design and performance*, London, Taylor & Francis.
- BAUMSCHLAGER EBERLE. u.d. 2226 [Online]. Tilgjengeleg frå: <http://www.baumschlagereberle.com/en/projects/project-details/project/buerogebaeude.html> [Lest 15.april 2016].
- BRAGER, G., PALIAGA, G., DE DEAR, R. og BRAGER, G. 2004. Operable Windows, Personal Control, and Occupant Comfort. *ASHRAE Transactions*, 110, s. 17-35.
- BRAGER, G. S. og DE DEAR, R. J. 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy & Buildings*, 27, 83-96.
- BYGGFORSK 1999. *421.501 Temperaturforhold og lufthastighet: Betingelser for termisk komfort*, Oslo, Norges byggforskningsinstitutt.
- BYGGFORSK 2009. *522.891 Etasjeskillere i massivtre*, SINTEF Byggforsk.
- BØHN, T. I., ULRIKSEN, T. og WEYDAHL, E. 2006. *Veiledning for næringsbyggrådgivere*, Oslo, Enova SF.
- COWI 2011. *Funksjonsbeskrivelse - NINA på Gløshaugen: Beskrivelse av Automatiseringsanlegg er en del av Entreprise E360 Luftbehandlingsanlegg inkl. automatiseringsanlegg*.
- DALAKER, L. 2009. Notat 03-09: Biblioteker til energimerkeordningen. Multiconsult, Oslo.
- DE GIDS, W. og PHAFF, H. 1982. Ventilation rates and energy consumption due to open windows: A brief overview of research in the Netherlands. *Air infiltration review*, 4 (1), s. 4-5.
- DIREKTORATET FOR BYGGKVALITET 2010. *Veiledning om tekniske krav til byggverk: Kapittel 13 Miljø og helse*, Direktoratet for byggkvalitet.
- DIREKTORATET FOR BYGGKVALITET. 2011. *Byggteknisk forskrift med veiledning (TEK10)* [Online]. Direktoratet for byggkvalitet. Tilgjengeleg frå: <http://dibk.no/no/BYGGEREGLER/Gjeldende-byggeregler/Veiledning-om-tekniske-krav-til-byggverk/> [Lest 02.mars 2016].

- DIREKTORATET FOR BYGGKVALITET. 2016. *TEK17* [Online]. Tilgjengeleg frå: <https://www.dibk.no/no/byggeregler/tek17/> [Lest 19.mai 2016].
- EBERLE, D. og AICHER, F. 2016. *Die Temperatur der Architektur = The Temperature of architecture : Portrait eines energieoptimierten Hauses = portrait of an energy-optimized house*, Basel, Birkhäuser.
- ENOVA. u.d. *NINA hovedkontor, Trondheim: Kontorbygg i passivhusstandard med dekker av massivtre* [Online]. Tilgjengeleg frå: <http://www.enova.no/innsikt/historier/forbildebygg/kontorbygg/nina-hovedkontor/677/1555/> [Lest 25.mai 2016].
- EQUA. 2016. *IDA Indoor Climate and Energy* [Online]. Tilgjengeleg frå: <http://www.equa.se/en/ida-ice> [Lest 03.mai 2016].
- FANGER, P., MELIKOV, A., HANZAWA, H. og RING, J. 1988. Turbulens og træk. *VVS Danmark*, 24. årg. No 9, s. 6-7.
- FOLKEHELSEINSTITUTTET 2015. Anbefalte faglige normer for inneklima: Revisjon av kunnskapsgrunnlag og normer - 2015. Nasjonalt folkehelseinstitutt, Nydalen.
- FORSKNINGSRÅDET. 2015. *Naturlig klimatisering av fremtidens energieffektive kontorbygg* [Online]. Tilgjengeleg frå: <https://www.forskningsradet.no/prosjektbanken/#!/project/245435/en> [Lest 3.februar 2016].
- GOOGLE MAPS. 2016. *63°25'03.5"N, 10°24'23.2"E* [Online]. Tilgjengeleg frå: <https://www.google.no/maps/place/63%C2%B025'03.5%22N+10%C2%B024'23.2%2E/@63.4176544,10.4042433,494m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d63.417652!4d10.406432> [Lest 16.mai 2016].
- HEISELBERG, P., SVIDT, K. og NIELSEN, P. V. 2001. Characteristics of airflow from open windows. *Building and Environment*, 36, s. 859-869.
- INGEBRIGTSEN, S. 2015. *Ventilasjonsteknikk del 1*, Oslo, Skarland Press AS.
- KIMO INSTRUMENTS u.d. Technical Data Sheet: AQ 200 Air quality.
- KLIMA- OG FORURENSNINGSDIREKTORATET og STATENS VEGVESEN 2010. Klimakur 2020: Tiltak og virkemidler for å nå norske klimamål mot 2020. Oslo.
- KOMMUNAL- OG ARBEIDSDEPARTEMENTET 1949. *Byggeforskrift av 15.desember 1949, bind I*, Kommunal- og arbeidsdepartementet.
- KOMMUNAL- OG ARBEIDSDEPARTEMENTET 1969. *Byggeforskrift 1969*, Kommunal- og arbeidsdepartementet.
- LARSEN, T. S. og HEISELBERG, P. 2008. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. *Energy & Buildings*, 40, s. 1031-1040.
- MILTON, D. K., GLENCROSS, P. M. og WALTERS, M. D. 2000. Risk of Sick Leave Associated with Outdoor Air Supply Rate, Humidification, and Occupant Complaints. *Indoor Air*, 10, s. 212-221.
- MONBY, P. S. og VESTERGAARD, T. 1998. Styr på Naturlig Ventilation. *VVS/VVB 13*, s. 20-24.
- NORDBY, K. 2009. *Plusshus* [Online]. Oslo: ZERO - Zero Emission Resource Organisation. Tilgjengeleg frå: <http://www.zero.no/publikasjoner/plusshus> [Lest 19.mai 2016].
- NORSK INSTITUTT FOR NATURFORSKNING. u.d. *NINA-huset* [Online]. Tilgjengeleg frå: <http://www.nina.no/Om-NINA/NINA-huset> [Lest 03.mai 2016].
- NORSKE ARKITEKTERS LANDSFORBUND. u.d. *Rapport NINA hovedkontor* [Online]. Tilgjengeleg frå: <http://www.arkitektur.no/nina-hovedkontor?tid=158202> [Lest 02.mars 2016].
- NOVAKOVIC, V., HANSEN, S., THUE, J., SKARSTEIN, Ø. og GJERSTAD, F. 2007. *ENØK i bygninger: effektiv energibruk*, Oslo, Gyldendal Norsk Forlag AS.

- NTNU EIENDOMSFORVALTNING 2010. *Høring - Forslag til landsverneplan for Kunnskapsdepartementet - Bygninger under Kunnskapsdepartementets ansvarsområde*, Trondheim.
- P.O FANGER 1970. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*, New York, McGraw-Hill Book Company.
- PETERSSON, B.-Å. 2004. *Tillämpad byggnadsfysik*, Lund, Studentlitteratur.
- ROETZEL, A., TSANGRASSOULIS, A., DIETRICH, U. og BUSCHING, S. 2010. A review of occupant control on natural ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, s. 1001-1013.
- SANTAMOURIS, M. og WOUTERS, P. P. 2006. *Building ventilation: the state of the art*, London, Earthscan.
- SATISH, U. 2014. Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision- Making Performance. *Environmental health perspectives*.
- SCHOOFF, J. 2014. *House Without Heating: Office Building in Austria* [Online]. DETAIL. Tilgjengeleg frå: <http://www.detail-online.com/article/house-without-heating-office-building-in-austria-16667/> [Lest 15.april 2016].
- STANDARD NORGE 2006. *NS-EN ISO 7730:2005 - Ergonomi i termisk miljø: Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort*, Lysaker, Standard Norge.
- STANDARD NORGE 2007. *NS-EN 13779:2007 - Ventilasjon i yrkesbygninger: Ytelseskrav for ventilasjons- og romklimatiseringssystemer*, Lysaker, Standard Norge.
- STANDARD NORGE 2014. *NS-EN 15251:2007 - Inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk*, Lysaker, Standard Norge.
- STRAUME, E. G. 2013. *Signalbygg for Norsk institutt for naturforskning (NINA)* [Online]. HENT Magasinet. Tilgjengeleg frå: http://www.nina.no/portals/0/innholdssider/nina_hent_magasinet_nr2_2013.pdf [Lest 18. februar 2016].
- STRINDA HISTORIELAG. 2016. *Varmetekniske laboratorier NTNU* [Online]. Tilgjengeleg frå: http://www.strindahistorielag.no/wiki/index.php?title=Varmetekniske_laboratorier_NTNU [Lest 14.mai 2016].
- TANABE, S.-I., HANEDA, M. og NISHIHARA, N. 2015. Workplace productivity and individual thermal satisfaction. *Building and Environment*, 91, s. 42-50.
- TSI INCORPORATED 2013. *Air Velocity Transducer Model 8455/8465/8475*, USA.
- VAISALA 2001. *Hald-held Carbon Dioxide Meter GM70; User's guide*, Helsinki.
- VALANČIUS, R. og JURELIONIS, A. 2013. Influence of indoor air temperature variation on office work performance. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 21, s. 19-25.
- VON GRABE, J., SVOBODA, P. og BÄUMLER, A. 2014. Window ventilation efficiency in the case of buoyancy ventilation. *Energy and Buildings*, 72, s. 203-211.
- WARGOCKI, P., WYON, D. P., SUNDELL, J., CLAUSEN, G. og FANGER, P. O. 2000. The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity. *Indoor Air*, 10, s. 222-236.
- WARREN, P. R. 1977. Ventilation through openings on one wall only. In: HOODENDORN, C. J. og AFGAR, N. H. (eds.) *Heat and Mass Transfer in Buildings, Dubrovnik, Yugoslavia*. Energy Conservation in Heating, Cooling and Ventilating Buildings, Hemisphere, Washington, DC, s. 189-206.

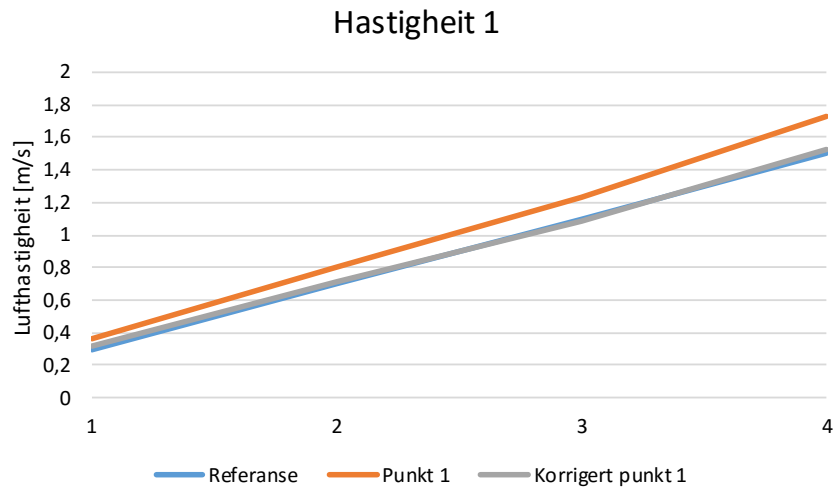
- WARREN, P. R. og PARKINS, L. M. Single-sided ventilation through open windows. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings; ASHRAE SP 49, 1985. s. 209-228.
- YUN, G. Y., STEEMERS, K. og BAKER, N. 2008. Natural ventilation in practice: linking facade design, thermal performance, occupant perception and control. *Building Research & Information*, 36, s. 608-624.

Vedlegg A Samtykke frå Standard Online AS

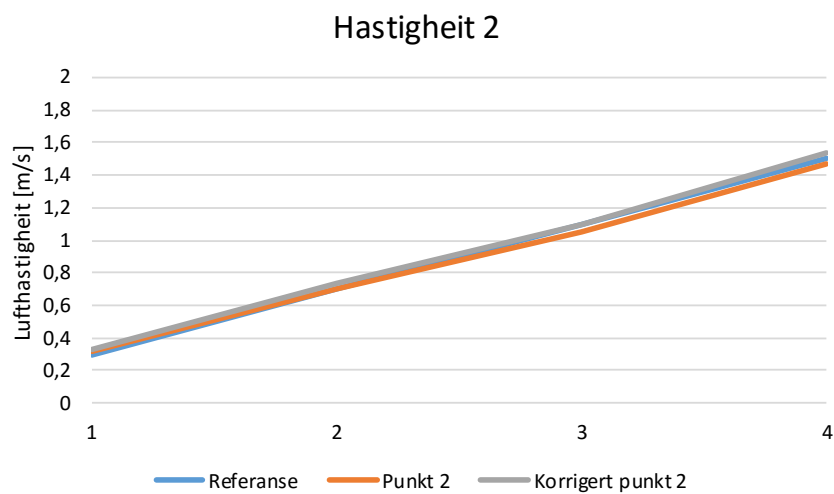
Figure 1 — PPD as function of PMV fra NS-EN ISO 7730:2005, utg. 3 Ergonomi i termisk miljø - Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort, er gjengitt av Ragni Melstveit i masteroppgaven " Naturleg ventilasjon og komfort i kontorbygg" med tillatelse fra Standard Online AS 05/2016. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se www.standard.no

Vedlegg B Korrigeringsfaktor for hastighet

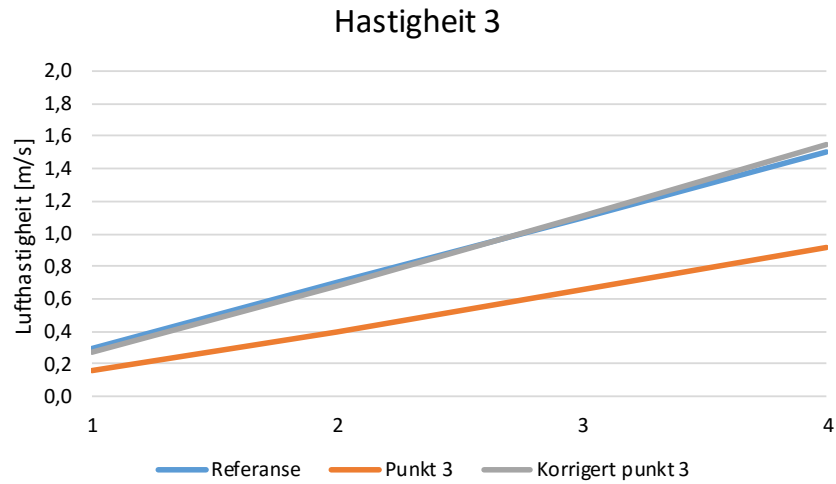
Kalibrering av hastighetsmålarane vart gjort ved hjelp av ein vindtrommel. Referansehastighet vart funne ved å kontrollere turtal og luftinntak i vindtrommelen. Korrigeringsfaktoren vart funne ut frå stigningstalet til referansehastigheita, og er vist grafisk for alle målepunkt under.



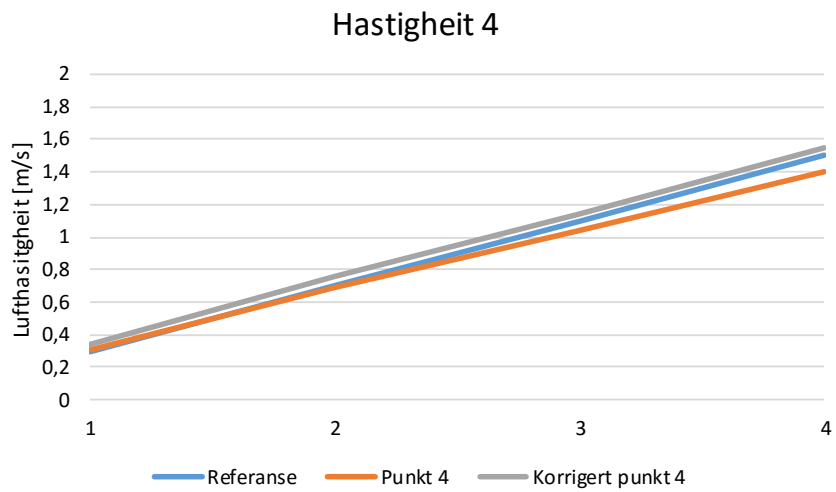
Figur B.1: Korrigering av hastighet 1. Faktor: 0,882



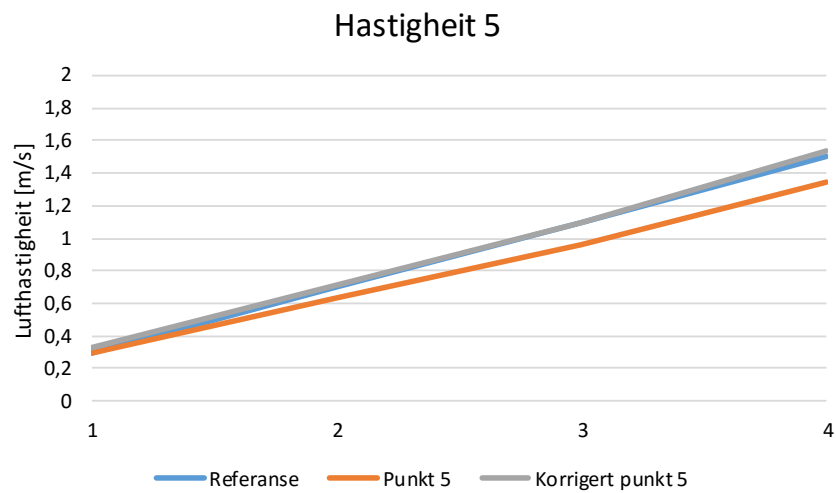
Figur B.2: Korrigering av hastighet 2. Faktor: 1,049



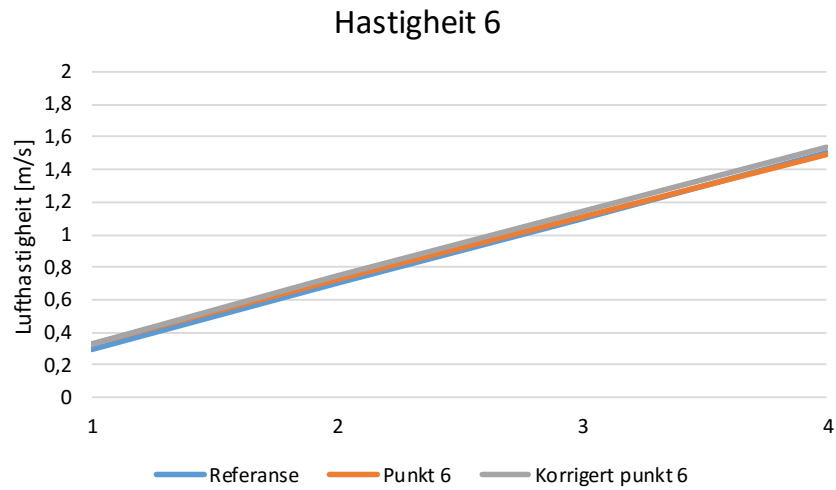
Figur B.3: Korrigering av hastighet 3. Faktor 1,700



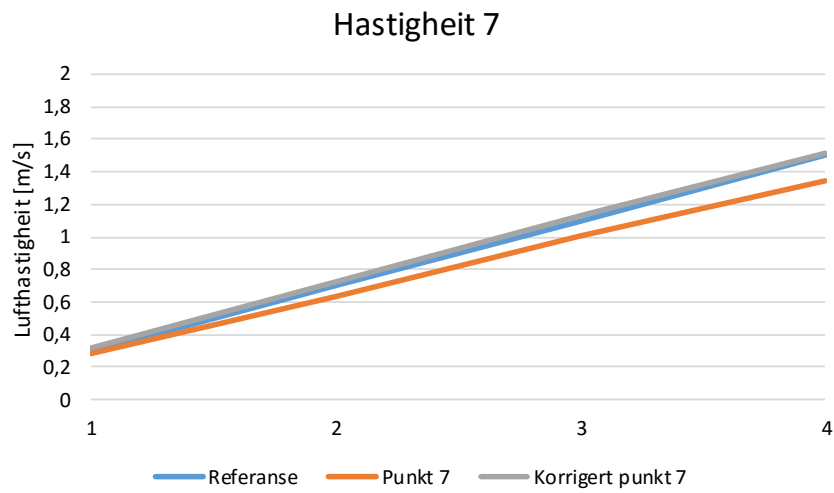
Figur B.4: Korrigering av hastighet 4. Faktor 1,102



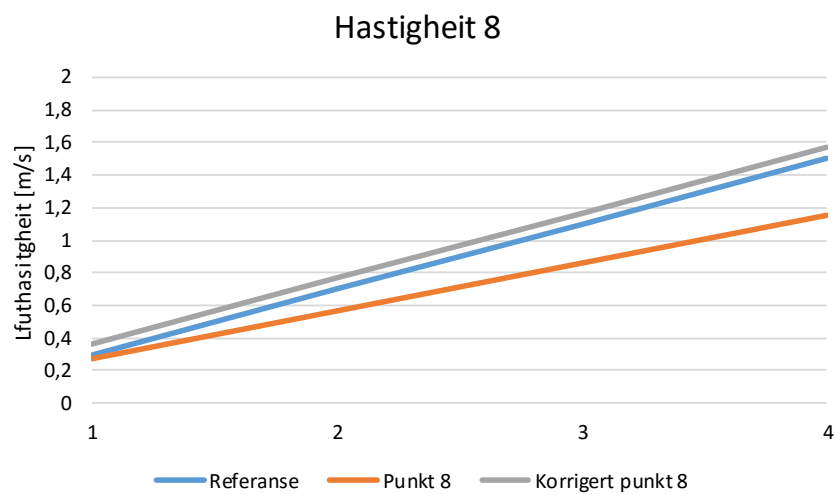
Figur B.5: Korrigering av hastighet 5. Faktor: 1,137



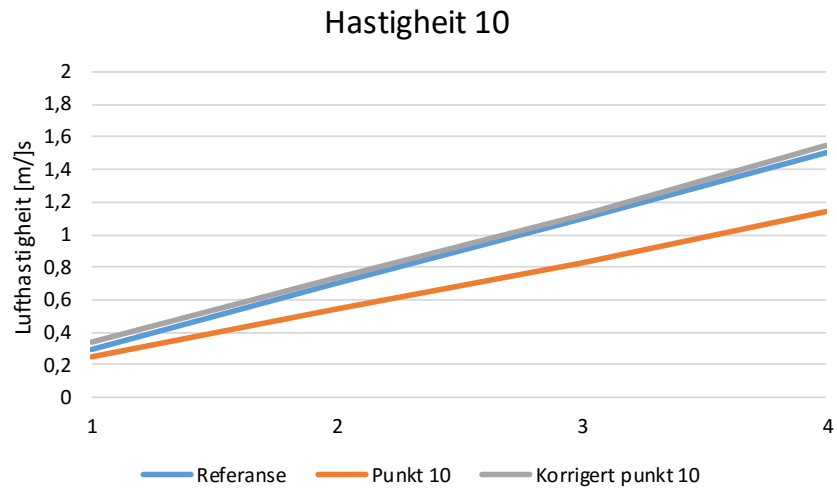
Figur B.6: Korrigering av hastighet 6. Faktor 1,030



Figur B.7: Korrigering av hastighet 7. faktor 1,130



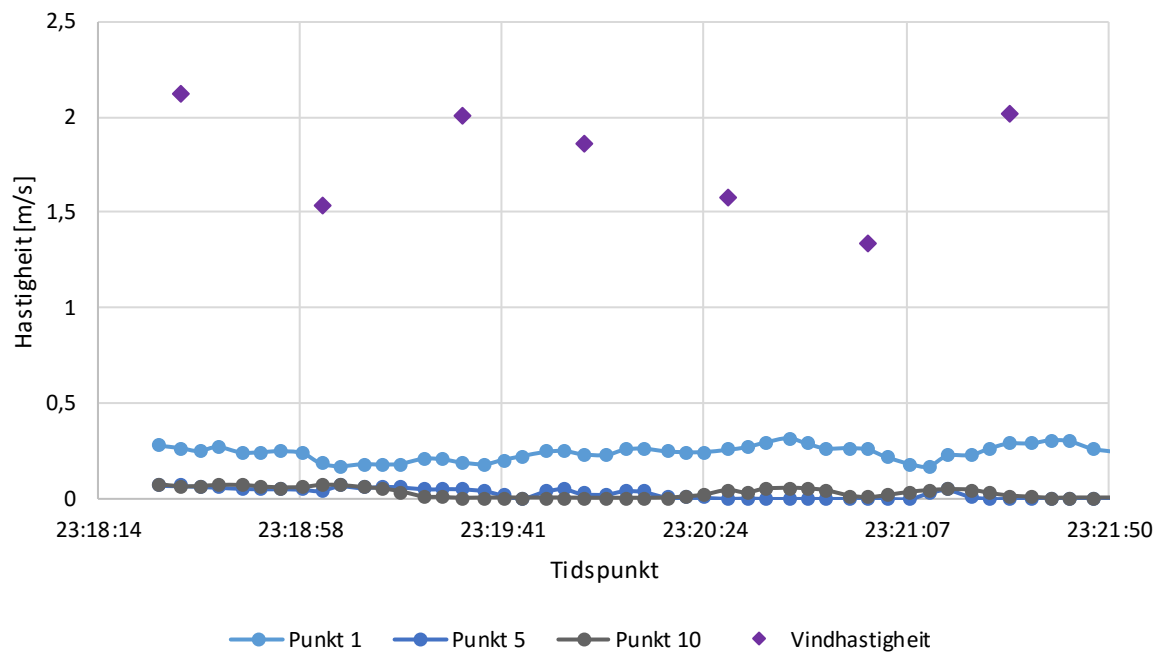
Figur B.8: Korrigering av hastighet 8. Faktor: 1,350



Figur B.9: Korrigering av hastighet 10. Faktor: 1,354

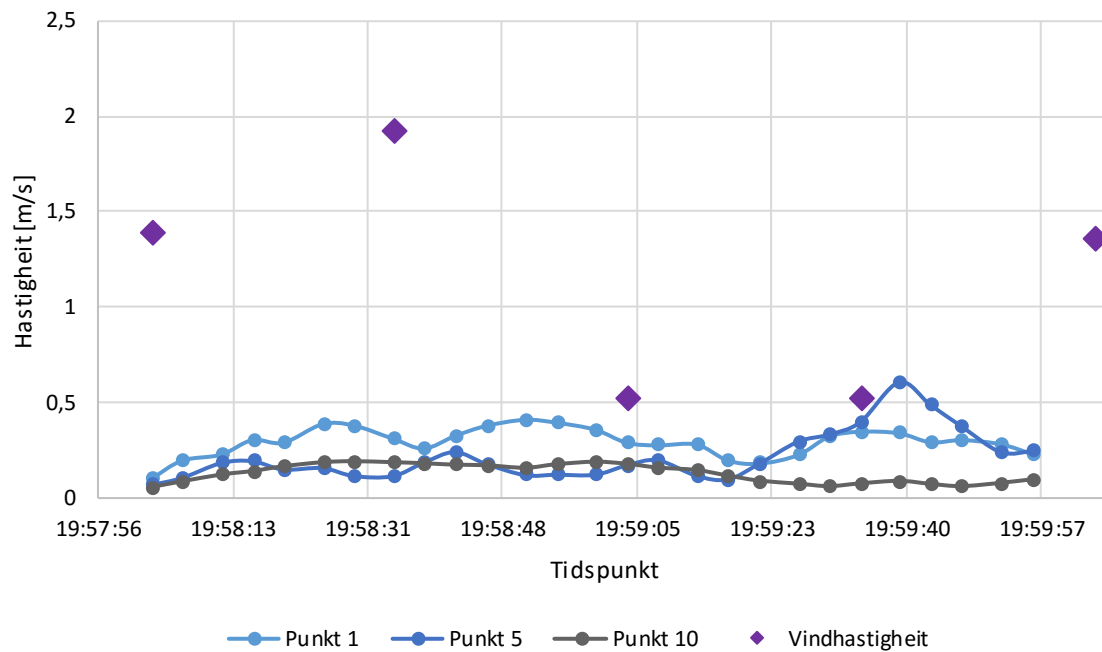
Vedlegg C Analyse av vêrdata

Samanlikning av inne- og utehastigheit 16.mars



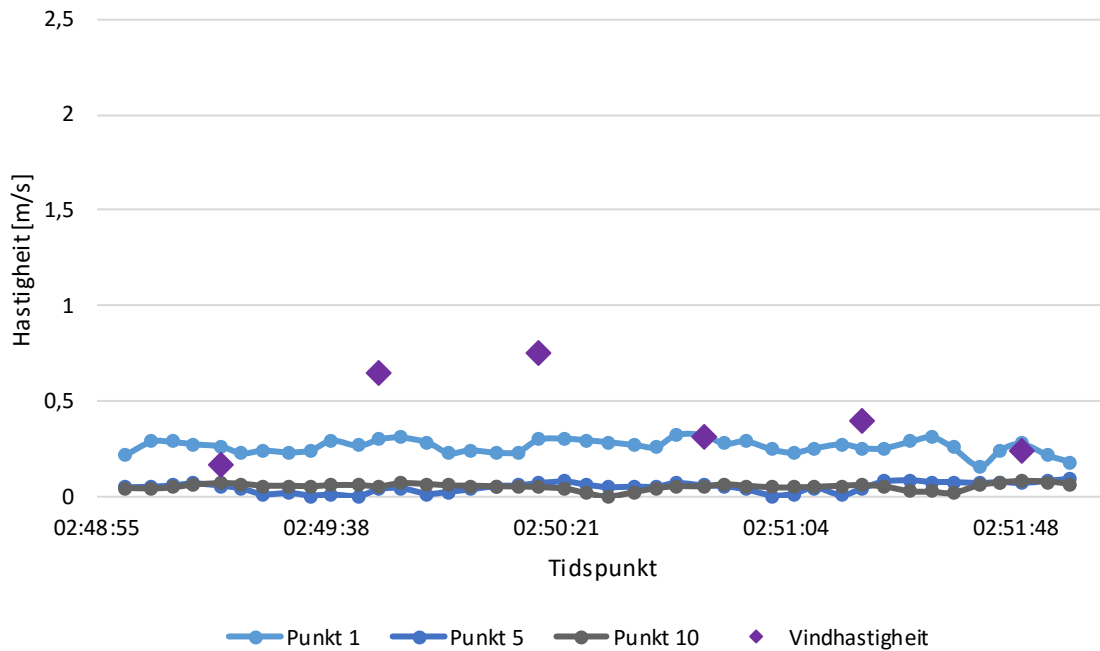
Figur C.1: Vindhastigheit 16. mars

Samanlikning av inne- og utehastigheit 17.mars



Figur C.2: Vindhastigheit 17. mars

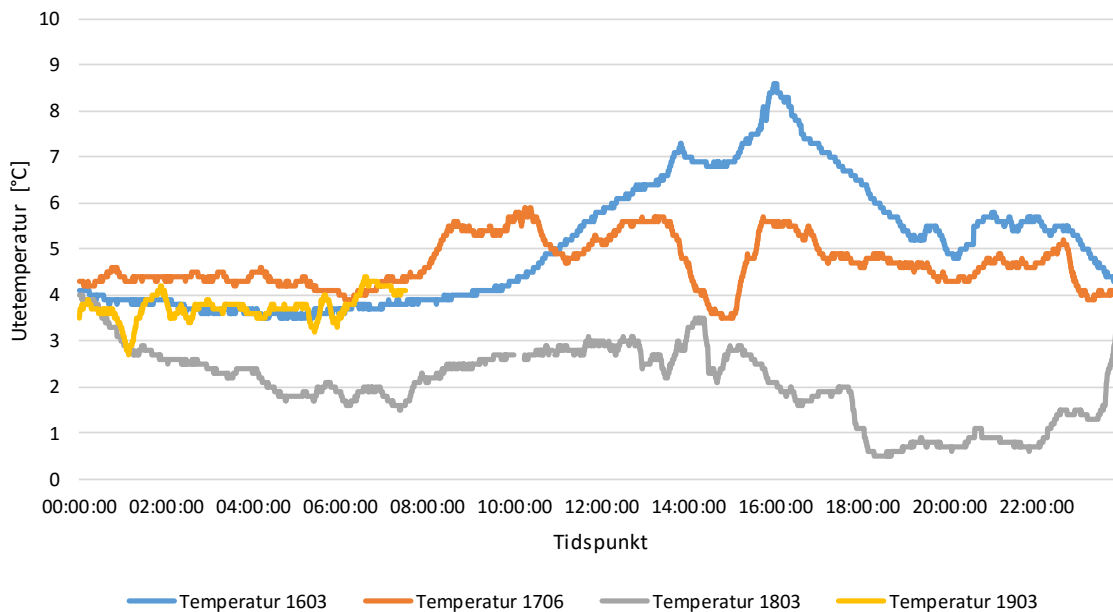
Samanlikning av inne- og utehastigheit 18.mars



Figur C.3: Vindhastigheit 18. mars

Frå dei tre grafane for hastigheit er det tydeleg at hastigheita inne ikkje vert påverka av vindhastigheita. Alle måla inne er teke 0,5 meter frå vindauga, mens vindhastigheita er henta frå måledata frå Living Lab. Analyse av grafane viser at uavhengig av kor høg utehastigheita er, låg mål hastigheit inne under 0,5 m/s. Den 18. mars ser ein også at målt hastigheit inne er høgare enn målt vindhastigheit.

Utetemperatur i måleperioden 16.mars - 19.mars



Figur C.4: Utetemperatur i måleperioden

Temperatur for døgera i måleperioden er presentert i Figur C.4. 19.mars kl 07.30 er det ikkje registrerte måldata. Korte periodar der SD-anlegget ikkje har logga er sletta frå grafen, og det kan observere små opphald i grafen der dette har skjedd. Sidan forsøka berre er gjort på kveld og nattetid, kan utetemperaturar på dagtid ignoreras.

Vedlegg D Utrekning av luftmengder

Luftmengdene som vart berekna i kapittel 6.2 vart gjort med bakgrunn i parametra som er lista opp i Tabell D.1. Brukte formlar er gitt i Tabell D.2. Mellomberekningar og resultat er vist i Tabell D.3.

Tabell D.1: Bestemte parameter nytta i utrekning av luftmengder

Parametre	Verdi	Eining
A_{rom}	184,6	m ²
Personar	30	stk
Aktivitetsnivå	1,2	met
Personar per areal	6	m ² /person
Olfbelasting person	1	olf/person
Olfbelasting material	0,1	olf/m ²
Luftmengde personbelasting	26	m ³ /t·person
Luftmengde forureining material	2,6	m ³ /t·m ²
Utandørs CO ₂ -konsentrasjon	400	ppm
Innandørs maksimum CO ₂ -nivå	1000	ppm
Høgast prosentdel misnøgde	20	%
Utandørs luftkvalitet C_u	0,2	decipol
Ventilasjonseffekt E_v	1	-

Tabell D.2: Formlar nytta for utrekning av luftmengder.

$Q_{emisjon} = A + B$	[m ³ /t]
$A = \frac{m^3}{h \cdot person} \cdot n$	[m ³ /t]
$B = \frac{m^3}{h \cdot m^2} \cdot A_{cl}$	[m ³ /t]
$G_{tot} = \frac{olf/person}{m^2/person} + \frac{olf}{m^2} \cdot A_{cl}$	[olf]
$C_i = 112 \cdot (\ln(PPD) - 5,98)^{-4}$	[dp]
$Q_{luftkvalitet} = \frac{10 \cdot G}{C_i - C_u} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v}$	[l/s]
$G_{CO_2} = \frac{15 \cdot M \cdot n}{3600}$	[l/s]
$Q_{CO_2} = \frac{10^6 \cdot G_{CO_2}}{C_{i,CO_2} - C_{u,CO_2}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v}$	[l/s]

Tabell D.3: Utrekna luftmengder basert på emisjon, luftkvalitet og CO₂.

Luftmengd basert på emisjon i rommet		
Personar	780	m ³ /t
Material	479,96	m ³ /t
Luftmengd	1259,96	m³/t
Luftmengd basert på luftkvalitet		
G _{person}	0,2	Olf
G _{material}	0,1	Olf
G _{total}	49,2	Olf
Berekna innandørs luftkvalitet C _i	1,4	decipol
	406,1	l/s
Luftmengd	1462,1	m³/t
Luftmengd basert på CO ₂		
G _{person}	0,15	l/s
	250	l/s
Luftmengd	900	m³/t