



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Dokumentasjon av termisk komfort ved en uisolert massivtreskole med desentral ventilasjon

Hanne Sofie Stokkenes
Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet våren 2022 ved fakultet for realfag og teknologi på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng og markerer siste steg på veien til fullført sivilingeniørutdannelse i byggeteknikk og arkitektur. En utdanning som for meg har betydd mye, og som jeg verdsetter svært høyt. Tema for oppgaven er problemstillinger knyttet til termisk innemiljø, komfort og energieffektivitet, hvor en case-studie er brukt i arbeidet. Dette dypdykket i bygningsfysikk har vært både moro og lærerikt, og jeg anser meg som heldig som har hatt denne muligheten til å bruke så mye tid på noe som jeg finner så spennende.

En stor takk for all veiledning til Thomas Kringlebotn Thiis og Geir Isak Vestøl. Behjelpelige og hyggelige ansatte ved Elverum kommune fortjener også en stor takk. Til sist en takk til mine nære og kjære, og til mine fine klassekamerater for all støtte og oppmuntring.

Sammendrag

Den termiske komforten og energiforbruket til bygninger er tett knyttet sammen. I senere tid har klimaforandringene økt viktigheten av å redusere karbonavtrykket til bygninger, hvor både materialbruk, og hvor mye energi som går med til å drifte bygningen er en del av regnestykket. Konstruksjonsmaterialet massivtre er i tillegg til å være miljøvennlig, et materiale som muligens kan påvirke både inn klima og energibruk positivt.

På Hanstad i Elverum ble det i 2017 bygget en skole av massivtre med desentral ventilasjon. Etter et par år i bruk rapporteres det om klager på den termiske komforten, og CO₂ målinger over anbefalt nivå. Denne oppgaven drøfter mulige årsaker for redusert termisk komfort, og ser på løsninger for å forbedre den termiske komforten og de ulike løsningenes påvirkning på energiforbruket. Det ses på hvordan forholdene for termisk komfort varierer i klasserommene gjennom sesongen, hvordan forholdene varierer mellom klasserommene, og hvordan den termiske komforten varierer innad i rommene. Det diskuteres også om forholdene er påvirket av ulik overflatebehandling.

Innvendig lufttemperatur fra sensormålinger er klassifisert ut ifra SN-CEN/TR 16798-2:2019s kategorier for inn klimakvalitet. Klassifiseringen viser at de største utfordringene for den termiske komforten i klasserommene er om sommeren. Sensormålinger er videre brukt til validering av simuleringer i SIMIEN og SIMSCALE. SIMSCALE brukes til å dokumentere variasjon i termisk komfort innad i klasserommene, samt lokale termiske diskomfort. I SIMIEN undersøkes andre parametere enn lufttemperaturen, deriblant PMV, PPD og CO₂-nivå, i tillegg til energibruk. Det utføres simulering av tiltak som kan forbedre den termiske komforten.

Fra simuleringene kommer det frem ulike problemstillinger på vinter- og sommerstid. På vinterstid er utfordringen dårlig kvalitet på innelufta grunnet trekk og CO₂ konsentrasjon over anbefalt nivå (1000 ppm). Årsak til lav innetemperatur er koblet mot begrensinger til ventilasjonsenhet. Høy CO₂ konsentrasjon er grunnet lav luftmengde og liten mulighet for vinduslufting grunnet kald utetemperatur. På sommerstid er utfordringen for høye innetemperatur grunnet mye vindusareal og høyt varmetilskudd fra solinnstråling.

Som tiltak for økt innetemperatur på sommeren foreslås utvendig solskjerming mot Sør-Vest, i tillegg til frikjølingen som benyttes fra før. For å forbedre luftkvalitet, samt minske ubehaget ved for kald innetemperatur anbefales det å bytte ut ventilasjonsenhetene til en enhet med større kapasitet på varmebatteriet, og som kan kjøre større luftmengde ved lavt støynivå.

Abstract

The thermal comfort and the energy consumption of a building is closely tied together. In recent times, more awareness about the global climate changes has emphasized the importance of reducing a building's carbon footprint, where both the use of material and the energy needed to manage the building on a daily basis is a part of the equation. CLT or cross laminated timber is, in addition to being environmentally friendly, a material that possibly has the properties to improve the indoor climate and reduce energy consumption.

In 2017 in Hanstad, Elverum there was built a small school building using CLT-construction combined with a decentralized ventilation system. A few years after completion the users complain about the quality of the indoor climate. They experienced too cold temperatures indoors at winter and too hot temperatures in the summer. It was also measured CO₂ levels in the classrooms above what is recommended for school buildings. This thesis discusses different possible causes to the poor thermal comfort, and how it affects the energy consumption. The thesis studies variation in thermal comfort in the classrooms throughout the seasons, the variation between classrooms, and how the thermal comfort varies within the classrooms by using simulations in SIMSCALE and SIMIEN. The thesis also discusses if the different surface treatments have any effect on the thermal comfort in the classrooms.

The results from simulation of thermal comfort match with sensor-measurements from the classrooms. By validating the simulations with the sensor measurements different changes are proposed and their effect on the thermal comfort and energy consumption studied.

Innholdsfortegnelse

Forord	1
Sammendrag	2
Abstract	3
Tabelliste	6
Figurliste	8
Forkortelser	9
1 Innledning	10
1.1 <i>Problemstilling</i>	10
1.2 <i>Motivasjon</i>	11
1.3 <i>Case-bakgrunn</i>	12
1.4 <i>Studiens avgrensing</i>	13
2 Teori	14
2.1 <i>Termisk komfort</i>	14
2.1.1 <i>Kroppens varmebalanse</i>	15
2.1.2 <i>PMV og PPD</i>	20
2.1.3 <i>Lokal termisk diskomfort</i>	21
2.1.4 <i>Krav til termisk komfort</i>	22
2.1.5 <i>Betydningen av termisk komfort og godt inneklima</i>	26
2.1.6 <i>Simscale</i>	28
2.2 <i>Ventilasjon</i>	29
2.2.1 <i>Ventilasjonstyper</i>	29
2.2.2 <i>Krav til ventilasjon</i>	31
2.3 <i>Bygningers energibruk</i>	32
2.3.1 <i>Varmetap</i>	32
2.3.2 <i>Varmetilskudd</i>	34
2.3.3 <i>Krav innenfor energieffektivitet i bygninger</i>	35
2.3.4 <i>SIMIEN</i>	36
2.4 <i>Treverk</i>	37
2.4.1 <i>Tre som materiale</i>	37
2.4.2 <i>Tre og inneklima</i>	40
2.4.3 <i>Tre og energi</i>	43
3 Metode	44
3.1 <i>Case-beskrivelse, Hanstad skole</i>	44
3.1.1 <i>Utforming og personbelastning</i>	45
3.1.2 <i>Konstruksjon</i>	46

3.1.3	Overflatebehandling.....	49
3.1.4	Beskrivelse av oppvarming og ventilasjonssystem.....	50
3.1.5	Energibruk.....	52
3.2	<i>Klimadata</i>	53
3.2.1	Sensorer for måling av termisk inneklime	53
3.2.2	Data for uteklime.....	54
3.2.3	Data for inneklime.....	55
3.3	<i>Dokumentasjon og klassifisering av termisk komfort i klasserom</i>	57
3.4	<i>Simulering av luftstrøm</i>	58
3.4.1	Inndata.....	59
3.4.2	Mesh-generering	62
3.5	<i>Simulering av termisk komfort og energibruk</i>	63
3.5.1	Inndata tiltak, utvendig solskjerming.....	66
3.5.2	Inndata energisimulering.....	66
4	Resultater	67
4.1	<i>Vurdering av termisk komfort i klasserom gjennom sensormålinger</i>	67
4.1.1	Vurdering av termisk komfort i klasserom etter forskrift om miljørettet helsevern.....	67
4.1.2	Vurdering av klasserom etter SN-CEN/TR 16798-2:2019	69
4.1.3	Variasjon i innvendig lufttemperatur mellom klasserom.....	71
4.1.4	Variasjon i lufttemperatur innad i rommene	72
4.1.5	Variasjon mellom behandlingene.....	74
4.1.6	Vurdering av innendørs relativ luftfuktighet i klasserom	75
4.2	<i>Vurdering av termisk komfort gjennom simulering i SIMSCALE</i>	76
4.2.1	Validering av simulering.....	76
4.2.2	Termisk komfort i oppholdssonen	78
4.3	<i>Vurdering av termisk komfort og energibruk gjennom simulering i SIMIEN</i>	82
4.3.1	Simulering av termisk komfort og innemiljøkvalitet	82
4.3.2	Simuleringer med tiltak for å øke termisk komfort om vinteren	86
4.3.3	Tiltak for å øke termisk komfort om sommeren	88
4.3.4	Simuleringer av energibruk.....	88
5	Diskusjon	91
5.1	<i>Vurdering av termisk komfort gjennom sensormålinger</i>	91
5.2	<i>Simuleringer</i>	93
	<i>Sammenligning av resultat mellom simuleringer</i>	94
	<i>Avvik og kritikk</i>	96
	<i>Videre arbeid</i>	95
6	Konklusjon	96

Tabelliste

TABELL 2-1 METABOLSK RATE FOR ULIKE AKTIVITETER	16
TABELL 2-2 ISOLASJONSVERDIER FOR ULIKE TYPER BEKLEDNING	17
TABELL 2-3 OPTIMAL TEMPERATUR FOR STILLESITTENDE AKTIVITET SOMMER OG VINTERSTID	19
TABELL 2-4 PMV- OVERSIKT, TABELL GJENGITT ETTER FIGUR FRA BYGNINGSFYSIKK (2015)	20
TABELL 2-5 ANBEFALTE VERDIER FOR OPERATIV TEMPERATUR FRA TEK.....	22
TABELL 2-6 GRENSEVERDIER FRA IS-2073	23
TABELL 2-7 KATEGORIER ETTER SN-CEN/TR 16798-2:2019.....	24
TABELL 2-8 GRENSEVERDIER FOR PMV OG PPD(STANDARD NORGE, 2019)	25
TABELL 2-9 KRAV OG GRENSEVERDIER FOR LOKAL DISKOMFORT(STANDARD NORGE, 2019)	26
TABELL 2-10 ANBEFALING FOR TEMPERATUREINTERVALL PÅ VINTER OG SOMMERSTID I KLASSEROM. I TIDEN MELLOM VINTER OG SOMMER KAN VERDIENE MELLOM SOMMER OG VINTER BENYTTES. UTDRAG FRA TABELL B.5(STANDARD NORGE, 2019).....	26
TABELL 2-11 KRAV TEK	31
TABELL 2-12 INTERNE VARMETILSKUDD I BYGNINGER	34
TABELL 2-13 ENERGIRAMMEKRAV FRA TEK10	35
TABELL 2-14 KRAV TIL U-VERDIER TEK10	35
TABELL 2-15 GRADERING AV DIFFUSJONSTETTHETEN TIL MATERIALER(THUE, 2002).....	41
TABELL 3-1 OVERSIKT OVER BRUK OG PERSONBELASTNING I NYBYGG VÅREN 2021	45
TABELL 3-2 ANSLÅTT U-VERDI YTTERVEGG	46
TABELL 3-3 ANSLÅTT U-VERDI ETASJESKILLER OVER 1. ETASJE.....	47
TABELL 3-4 ANSLÅTT U-VERDI ETASJESKILLER OVER 2. ETASJE	47
TABELL 3-5 EGENSKAPER VINDUER.....	48
TABELL 3-6 OVERSIKT VENTILASJON HANSTAD, KILDE EGENSKAPER: (TECALOR), (TECALOR), (TECALOR)	50
TABELL 3-7 LUFTMENGDE HANSTAD SAMMENLIGNET MED KRAV TEK10.....	51
TABELL 3-8 ESTIMERT ENERGIBRUK OPP MOT FORBRUK	52
TABELL 3-9 FERIER OG FRIDAGER 2021 VED HANSTAD SKOLE	55
TABELL 3-10 OVERSIKT OVER ANTALL DAGER OG TIMER INNENFOR HVER SESONG INNENFOR MÅLEPERIODEN	57
TABELL 3-11 SOLSTRÅLING VINTER	59
TABELL 3-12 SOLINNSTRÅLING SOMMER	59
TABELL 3-13 INPUT VINTERSIMULERING SIMSCALE	60
TABELL 3-14 INPUT SOMMERSIMULERING SIMSCALE	61
TABELL 3-15 MESH INFORMASJON	62
TABELL 3-16 SIMULERINGER I SIMIEN	63
TABELL 3-17 ANSLÅTT U-VERDI FOR BYGNINGSDELER	63
TABELL 3-18 G-FAKTOR VINDUER	63
TABELL 3-19 INNEKLIMAPARAMETERE FOR SIMULERINGER.....	63
TABELL 3-20 INTERNE VARMETILSKUDD FOR KOMFORTSIMULERING I KLASSEROM I SIMIEN	64
TABELL 3-21 INNDATA FOR VENTILASJON, KOMFORTSIMULERING I SIMIEN	64
TABELL 3-22 INNDATA FOR OPPVARMING, KOMFORTSIMULERING I SIMIEN.....	64
TABELL 3-23 VINDUSLUFTING, KOMFORTBEREGNING SIMIEN	64
TABELL 3-24 INNDATA UTEKLIMA I SIMIEN 09.02.01	65
TABELL 3-25 NY G-FAKTOR, ETTER TILTAK MED UTVENDIG SOLSKJERMING	66
TABELL 3-26 OVERSIKT AREALER FOR HVER SONE	66
TABELL 3-27 INTERNE VARMETILSKUDD I BYGNINGER	66

TABELL 3-28 GJENNOMSNIITTLIG EFFEKTBEHOV	66
TABELL 4-1 FORDELING AV MÅLINGER I KATEGORI IEQIII PÅ VINTEREN OG KATEGORI IEQIV PÅ SOMMEREN	71
TABELL 4-2 LUFTTEMPERATUR INNENDØRS FRA SENSORMÅLINGER OG SIMULERINGER	77
TABELL 4-3 SIMULERT VERTIKAL TEMPERATURDIFFERANSE I ROM 1N PÅ VINTERSTID KL 09	81
TABELL 4-4 VALIDERING AV KOMFORTSIMULERING FOR ROM 1N I SIMIEN	82
TABELL 4-5 VALIDERING AV KOMFORTSIMULERING FOR ROM 2S I SIMIEN	82
TABELL 4-6 TILTAKSOVERSIKT, VINTER	86

Figurliste

FIGUR 1-1 INTERIØR FRA KLASSEROM MED EKSPONERT MASSIVTRE PÅ VEGGER OG I TAK (FOTO: HS STOKKENES) ..	12
FIGUR 1-2 BYGNINGEN SOM ER UTGANGSPUNKT FOR DENNE STUDIEN, MED FOKUSPUNKTER. BILDE AV EKSTERIØR TATT AV HANNE KURE BJUGSTAD	13
FIGUR 2-1 OPTIMAL OPERATIV TEMPERATUR SOM FUNKSJON AV AKTIVITET OG BEKLEDNING (SINTEF BYGGFORSK, 2017D).....	18
FIGUR 2-2 SAMMENHENG PMV OG PPD(SINTEF BYGGFORSK, 2017D).....	20
FIGUR 2-3 OPPHOLDSSONE/UNDERVISNINGSSONE	23
FIGUR 2-4 SAMMENHENG MELLOM FRISKLUFFTILFØRSEL PER. PERSON OG PPD(SINTEF BYGGFORSK, 2017A).....	29
FIGUR 2-5 ILLUSTRASJON AV CELLEVEGG OG PROSENTVIS SAMMENSETNING AV CELLEVEGGEN (KUCERA, 1998) ...	37
FIGUR 2-6 MARKEDSANALYSE KL-TRE FRA 2020 TIL 2030 (AS, 2020)	39
FIGUR 2-7 BYGNINGERS TERMISK MASSE OG BETYDNING FOR ANDEL AV BRUKSTID MED HØY INNETEMPERATUR ...	40
FIGUR 3-1 SITUASJONSPLAN HANSTAD SKOLE	44
FIGUR 3-2 PLANTEGNING MASSIVTREBYGNING, HANSTAD SKOLE	45
FIGUR 3-3 DETALJER OVER VEGGKONSTRUKSJONER	46
FIGUR 3-4 DETALJ OVER GULV MOT GRUNN OG ETASJESKILLER OVER 1. ETASJE	47
FIGUR 3-5 DETALJ ETASJESKILLER OVER 2. ETASJE OG TAKKONSTRUKSJON.....	48
FIGUR 3-6 OVERSIKT, EKSPONERTE TROVERFLATER VS. OVERFLATEBEHANDLING	49
FIGUR 3-7 MÅLT CO ₂ TREND GJENNOM SENSOR I VENTILASJONSAGGREGAT FOR ROM 2S I 2021	51
FIGUR 3-8 PLANOVERSIKT SENSORER. PLASSERINGEN ER LIK I BEGGE ETASJER.....	53
FIGUR 3-9 OVERSIKT OVER VÆRSTASJONER I NÆRHETEN AV ELVERUM	54
FIGUR 3-10 VISUALISERING AV AKTUELLE SIMULERINGS-DAGER FOR VINTERUKE	56
FIGUR 3-11 VISUALISERING AV AKTUELLE SIMULERINGS-DAGER FOR SOMMERUKE	56
FIGUR 3-12 KLASSIFISERINGSNØKSEL FOR FLISA II UTREGNET ETTER LIGNING 2-5	57
FIGUR 3-13 SIMSCALE MODELL	58
FIGUR 3-14 MESHET MODELL OG REFINEMENT AV UTKAST OG AVTREKK	62
FIGUR 3-15 KALKULASJON AV HORISONT. MÅL HENTET FRA ARCHICAD-MODELL	64
FIGUR 4-1 SENSORMÅLINGER AV INNENDØRS LUFTTEMPERATUR MOT VINTERKRAV FRA FORSKRIFT OM MILJØRETTETHELSEVERN	67
FIGUR 4-2 SENSORMÅLINGER AV LUFTTEMPERATUR INNENDØRS MOT SOMMERKRAV FRA FORSKRIFT OM MILJØRETTETHELSEVERN	68
FIGUR 4-3 SENSORMÅLINGER AV INNENDØRS LUFTTEMPERATUR FOR HELE MÅLEPERIODEN MOT YTTERGRENSER FRA FORSKRIFT OM MILJØRETTETHELSEVERN	68
FIGUR 4-4 KLASSIFISERING AV DE ULIKE ROMMENE PÅ VINTERSTID	69
FIGUR 4-5 KLASSIFISERING AV DE ULIKE ROMMENE PÅ VÅREN	69
FIGUR 4-6 KLASSIFISERING AV DE ULIKE ROMMENE PÅ SOMMERTID.....	70
FIGUR 4-7 SAMLET TERMISK VURDERING FOR KLASSEROMMENE.....	70
FIGUR 4-8 FORDELING AV INNENDØRS LUFTTEMPERATUR I HVERT KLASSEROM.....	71
FIGUR 4-9 TEMPERATURDIFFERANSER INNAD I KLASSEROM	72
FIGUR 4-10 GJENNOMSNIIT-, MINSTE- OG MAKSIMUMSTEMPERATURER I HVERT KLASSEROM	73
FIGUR 4-11 LUFTTEMPERATUR GRUPPERT ETTER OVERFLATEBEHANDLING.....	74
FIGUR 4-12 OVERSIKT OVER RELATIV LUFTFUKTIGHET INNDELTT ETTER MÅNED, SAMT OVERSIKT FOR HELE PERIODEN	75
FIGUR 4-13 VARIASJON I INNVEDIG RF GJENNOM SKOLEDAGEN FOR EN VARM OG KALD DAG	75
FIGUR 4-14 KONVERGENSPLOTT.....	76

FIGUR 4-15 KONVERGENSPLOTT FOR AVKAST FOR N1 KL. 09 MED 2000 ITERASJONER	77
FIGUR 4-16 SIMULERING AV LUFTTEMPERATUR I ROM 1N OM VINTEREN I SIMSCALE.....	78
FIGUR 4-17 SIMULERING AV PMV I ROM 1N OM VINTEREN I SIMSCALE	78
FIGUR 4-18 SIMULERT PPD I ROM 1N OM VINTEREN I SIMSCALE	79
FIGUR 4-19 SIMULERING AV LUFTTEMPERATUR I ROM 1S OM SOMMEREN I SIMSCALE	79
FIGUR 4-20 SIMULERING AV PMV I ROM 1S OM SOMMEREN I SIMSCALE	80
FIGUR 4-21 SIMULERING AV PPD I ROM 1S OM SOMMEREN I SIMSCALE	80
FIGUR 4-22 SIMULERT VERTIKAL TEMPERATURDIFFERANSE I ROM 1N PÅ VINTERSTID KL. 09.....	81
FIGUR 4-23 SIMULERT LUFTTEMPERATUR OG INTERNT VARMETILSKUDD I ROM 1N, VINTERSTID.....	83
FIGUR 4-24 SIMULERT TILLUFT OG CO ₂ NIVÅ I ROM 1N, VINTERSTID	83
FIGUR 4-25 SIMULERT PPD OG PMV I ROM 1N, VINTERSTID	84
FIGUR 4-26 SIMULERT KALDRAS OG TEMPERATURASYMMETRI I ROM 1N, VINTERSTID	84
FIGUR 4-27 SIMULERT LUFTTEMPERATUR OG INTERNT VARMETILSKUDD I ROM 2S, SOMMERSTID	85
FIGUR 4-28 SIMULERT TILLUFT OG CO ₂ NIVÅ I ROM 1N, VINTERSTID	85
FIGUR 4-29 SIMULERT PPD OG PMV I ROM	86
FIGUR 4-30 SIMULERT EFFEKT AV REDUSERT PERSONBELASTNING I ROM 1N PÅ VINTEREN.....	87
FIGUR 4-31 SIMULERT EFFEKT PÅ TERMISK KOMFORT AV ØKT SETTEMPERATUR PÅ RADIATORER.....	87
FIGUR 4-32 SENTRALE INNDATA I SIMIEN KLIMA	88
FIGUR 4-33 SENTRALE INNDATA I SIMIEN	88
FIGUR 4-34 SIMULERT ENERGIBUDSJETT.....	89
FIGUR 4-35 ÅRLIG ENERGIBUDSJETT	89
FIGUR 4-36 VARMETAPSBUDSJETT	90

Forkortelser

BRA	Bruksareal
CAV	Constant Air volume, konstant luftmengde
CFD	Computational fluid dynamics, numerisk strømnings simulering
CLT	Cross laminated timber, massivtre eller krysslimt-tre (KL-tre)
IEQ	Indoor environmental quality, kvaliteten til miljøet innendørs bestående av de fire parameterne luftkvalitet, termisk komfort, lys og akustikk.
PMV	Predicted mean vote, forventet gjennomsnittlig vurdering
PPD	Predicted prosentage of dissatisfied, forventet andel misfornøyde
RF	Relativ luftfuktighet
SBS	Sick building syndrome, sykt bygg syndrom
SD	Sentralt driftsanlegg
TEK	Teknisk forskrift
VAV	Variable Air volume, variabel luftmengde
VOC	Volatile organic compound, flyktige organiske forbindelser

1 Innledning

1.1 Problemstilling

Problemstilling for oppgaven:

Hvordan påvirkes termisk komfort og energibruk i en uisolert skole i massivtre med desentral ventilasjon og ulike typer overflatebehandling?

Forsknings spørsmål:

- I Hvordan påvirker desentral ventilasjon den termiske komforten lokalt i et klasserom?
- II Hvordan er energibruken og den termiske komforten til en skole i uisolert massivtre med desentral ventilasjon?
- III Hvordan er den termiske komforten i klasserommene med diffusjonstett overflatebehandling sammenlignet med klasserommene med ubehandlede treoverflater?
- IV På hvilken måte påvirkes utformingen av utdanningsarealer av desentral ventilasjon?

Bakgrunnsinformasjon

I 2017 fikk Hanstad skole i Elverum et tilskudd til bygningsmassen, en uisolert massivtrebygning med desentral ventilasjon. I bygningen skulle det forskes på inneklime og energibruk i trekonstruksjoner. Etter noen år rapporteres det om dårlig termisk komfort blant elevene, med for høy innetemperatur på sommeren, og for lav på vinteren. Det måles ofte CO₂ nivåer over 1000 ppm, og driftsteknikerne har utfordringer med å opprettholde akseptabelt inneklime. I denne oppgaven blir ulike årsaksforhold drøftet, og mulige løsninger på problemene foreslått. Klasserommene har ulik overflatebehandling, og innvirkningen av denne behandlingen blir også diskutert.

For å svare på de valgte problemstillingene er sensormålinger på inneklimate bearbeidet og analysert. Sensormålingene er brukt til å utføre og validere numeriske simuleringer for beregning av termisk komfort og energibruk. Simuleringene er videre modifisert med tanke på å finne mulige løsninger for økt komfort.

1.2 Motivasjon

Med en raskt økende menneskepopulasjon øker også forbruket av energi, og utslipp av klimagasser. 4. april i år publiserte FNs klimapanel tredje del av sin 6. hovedrapport (FNs Klimapanel, 2022), som omhandler utslippsreduksjon, opptak og virkemidler. Om utslipp knyttet til bygninger står det:

*I 2019 kom omtrent 6 prosent av globale utslipp fra bygninger. Legger man til indirekte utslipp fra elektrisitet og oppvarming, øker andelen til 16 prosent. Mellom 1990 og 2019 økte utslippene fra privatboliger med 50 prosent, mens utslippene fra bygninger med andre formål økte 55 prosent, blant annet som følge av større areal per person, befolkningsvekst og høyere energibruk. Både den eksisterende og planlagte globale bygningsmassen kan nå netto null klimagassutslipp innen 2050. Dette forutsetter at det gjennomføres klimatiltak på både nåværende og fremtidige bygg. Eksempler er tiltak i designfasen og konstruksjons- og bruksfasen, blant annet **ved å bruke materialer med lave utslipp og begrense behovet for energi og materialer.***

Av dette ser vi at 1) utslippene fra bygninger øker voldsomt, 2) det er håp om å nå at målet om klimanøytralitet for bygninger innen 2050, og 3) at vi må gjøre tiltak. Termisk komfort i en massivtreskole er på mange måter aktuell for denne tematikken. Energi brukt til oppvarming og ventilasjon er energi direkte knyttet til inneklimate og termisk komfort. Videre er treverk et fornybart materiale som binder CO₂. Det har egenskaper som kan påvirke innemiljøet, og kanskje også energiregnskapet positivt.

At termisk komfort og energibruk er viktig, dokumenteres gjennom forskningen som har blitt gjort og som utføres i dag. Et eksempel er det nyetablerte forskningsprosjektet Smart Building Hub, som er et prosjekt med hensikt i å etablere infrastruktur tilknyttet energieffektiviteten til bygninger og målinger av inneklimate (SINTEF, 2021). At vi med dagens teknologi får muligheten til å loggføre energi i kombinasjon med inneklimate kan gi oss enda dypere innsikt i hvordan man kan redusere energibruken uten at det går på bekostning av inneklimate.

Termisk komfort og inneklimate i skoler har ekstra stor betydning. Barn er mer sårbare for påvirkningen av dårlig inneklimate enn voksne, og vil på en skole ha begrenset mulighet til å påvirke forholdene som de utsettes for. I løpet av et liv tilbringes mange timer inne i klasserommet, noe som gir lang eksponeringstid for potensielt dårlig inneklimate. Et inneklimate som kan ha negative konsekvenser for helsen, og for læringsutbyttet til elevene.

Gjennom dette forstår vi at det må finnes en balansegang hvor vi både kan oppnå akseptabel termisk komfort, og lav energibruk. Med utgangspunkt i utviklingen fra 2020 sier FNs sjette rapport at den globale oppvarmingen vil øke med 3.2 grader innen 2100, og at vi altså vil være langt unna 1.5 graders målet som ble satt i Parisavtalen. Dette poengterer

viktigheten av at vi må jobbe enda hardere med å redusere klimautslipp gjennom redusert energibruk og ved å velge gode materialer til bygningene våre, og viktigheten av at vi må bruke vår påvirkningskraft som entreprenører og rådgivere for å bidra.

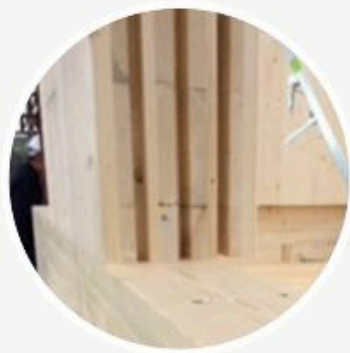
1.3 Case-bakgrunn

Hanstad skole ligger nord i Elverum kommune på østsiden av Glomma, og har omtrent 470 elever (juni 2020). Hovedbygningen ble oppført i 1982, men fikk raskt behov for mer undervisningsareal. Den første utvidelsen ble gjort i 1997, og i 2015 startet arbeidet med nye utvidelser og planlegging av rehabilitering av den gamle skolen. Det ble da lagt til en modulrigg med 4 nye klasserom. Grunnet ytterligere behov under rehabiliteringen ble det vedtatt å bygge et tilskudd til de eksisterende skolebygningene. Det resulterte i et toetasjes uisolert bygg i massivtre, som kom på plass i løpet av sommeren 2017. Nybygget ble oppført som en midlertidig løsning, med tanke på omgjøring til permanent bygg etter fem år. Interiøret til et av klasserommene er vist i figur 1-1 og eksteriør i figur 1-2.

Flere aspekter lå bak valget av det nye byggets utradisjonelle konstruksjon (Norsk Kommunalteknisk forening, 2017). Et aspekt var ønsket om å utfordre teknisk forskrift, ved å undersøke om forskriftene er tilpasset konstruksjoner i tre. Bygget skulle være robust med tanke på drift og vedlikehold, det skulle være energibesparende, og det skulle ha godt innemiljø. Forskning på innemiljø ble finansiert av Regionalt forskingsfond, og utredet av Treteknisk institutt i samarbeid med NMBU, og miljørettet helsevern ved kommuneoverlegen i Elverum. At mange skoler rapporterer om utfordringer med hodepine, trøtthet og nedsatt konsentrasjon hos elever og ansatte var bakgrunnen for kommuneoverlegens deltagelse i prosjektet.



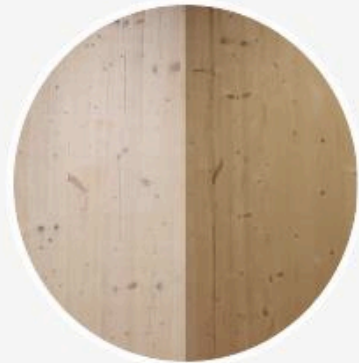
Figur 1-1 Interiør fra klasserom med eksponert massivtre på vegger og i tak (Foto: HS Stokkenes)



Uisolert yttervegg av
340 mm massivtre



Desentral ventilasjon i
klasserommene



Klasserom med ulik
overflatebehandling

*Figur 1-2 Bygningen som er utgangspunkt for denne studien, med fokuspunkter.
Bilde av eksteriør tatt av Hanne Kure Bjugstad.*

1.4 Studiens avgrensning

Inneklima omfatter flere faktorer enn termisk komfort. For å få en komplett oversikt over et roms inneklima må man også se på atmosfærisk (forurensninger i inneluft), akustisk, aktinisk (lys og stråling) og mekanisk miljø. I denne oppgaven er det i hovedsak det termiske aspektet ved inneklimaet som er undersøkt. Akustisk, aktinisk og mekanisk, eller parametere som beskriver innemiljøet slik som estetikk og psykososiale forhold blir ikke diskutert.

Undersøkelsene er basert på termiske målinger, og ikke spørreundersøkelser. Utplassering av inneklima-sensorer er ikke utført av forfatter. I bygningen er det bare termisk komfort i klasserommene som er undersøkt, og ikke forholdene i grupperom osv.

2 Teori

I denne delen av oppgaven gjennomgås teori som er nødvendig for forståelsen av valgt tema, og som benyttes som grunnlag for diskusjon av resultater og problemstilling. Kapittelet er delt inn i fire deler; termisk komfort, ventilasjon, energibruk i bygninger og tre som materiale.

2.1 Termisk komfort

Temaet termisk komfort omhandler hvordan vi som mennesker oppfatter varme og kulde. Begrepet er i standard NS-EN ISO 7730 definert på denne måten (norsk oversettelse fra boka ENØK i bygninger(NTNU, 2007)):

«Termisk komfort er en sinnstilstand der vi uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelser»

Å være i full tilfredshet vil si at man ikke opplever ubehag i form av kulde eller varme, men er nøytral til de termiske omgivelsene. At ordet sinnstilstand benyttes i definisjonen, sier noe om hvor subjektivt begrepet termisk komfort er. Subjektiviteten knyttes til individuelle ulikheter i varmebalanse, og at varmebalansen varierer ut ifra kjønn, alder, kroppsfasong osv. I tillegg til «indre» faktorer vil også ytre faktorer som bekledding, påvirkning fra stråling, omkringliggende lufttemperatur, lufthastighet og luftfuktighet påvirke varmebalansen. Om oppfattelsen av termisk komfort må det også nevnes at grad av personlig kontroll, gjennom vinduslufting eller justering av bekledding også spiller inn.

Den termiske komforten i et rom, eller i en bygning vil være avhengig av mange faktorer, og på grunn av sin subjektive art være vanskelig å tallfeste. For å løse dette problemet ble PMV og PPD-indeksene dannet. Mannen bak indeksene er dansken Povl Ole Fanger, og han har mye av æren for det metodiske grunnlaget for kartlegging av termisk komfort i bygninger, selv den dag i dag. Som en del av sin doktorgradsavhandling utførte han på 1960-tallet en studie på en stor gruppe mennesker for å gi statistisk grunnlag for termisk komfort(Fanger, 1970). Arbeidet resulterte i komfortligningen, og de to nevnte indeksene. Komfortligningen gav større forståelse av sammenhengen mellom de ulike faktorene som påvirker termisk komfort, og hvordan de burde kombineres for å oppnå nøytralt nivå. Indeksene brukes i vurderingen av den termiske komforten i en bygning, og forteller i hvilken grad (PMV), eller hvor stor andel av en gruppe (PPD), som er utilfredse med det termiske miljøet.

Det må også nevnes at i tillegg til PMV og PPD har lokal termisk diskomfort betydning for den termiske komforten. Indeksene beregner den termiske komforten for kroppen i sin helhet, men ved for store temperaturforskjeller mellom hode og ankel, eller ved stor strålingsasymmetri i rommet, vil kroppen likevel kunne føle diskomfort.

2.1.1 Kroppens varmebalanse

Som for flere av de varmblodige dyrene, har menneskekroppen en kjernetemperatur på omtrent 37 grader. Dette ettersom de indre organene trenger et stabilt miljø, samt at 37 grader er temperaturen hvor enzymene jobber best. For at kroppen skal kunne opprettholde denne temperaturen på et stabilt nivå utføres ulike prosesser i kroppen for å ta opp varme eller skille varme ut. Gjennom prosessen oksidasjon, forbrennes næringsstoffer sammen med oksygen til kjemisk energi. Restmaterialet består av vann og CO₂. Energien fra næringsstoffene omgjøres i stor grad til varme, men også noe til dannelse av ny cellevekst og utførelse av mekanisk arbeid. I blodet transporteres varmen til ulike deler av kroppen, og gjennom huden ut til omgivelsene. Overføringen av varme skjer på flere ulike måter; gjennom stråling, konveksjon, konduksjon, fordamping av svette, vandampdiffusjon gjennom huden og oppvarming av respirasjonsluft. Alle disse faktorene bidrar til menneskers varmebalanse, vist gjennom varmebalanseligningen, hentet fra boka ENØK, energieffektivitet i bygninger (NTNU, 2007) formel 4.2. Denne er oppført her som formel 2-1. Sammen med varmebalansen utgjør overflatetemperaturen på huden og svetteproduksjon de tre hovedbetingelsene for termisk komfort. Hvert ledd i varmebalanseligningen forklares i eget delkapittel, og deretter ytterlige eksterne faktorer som påvirker varmebalansen.

Formel for varmebalanse:

$$S = M - W - K - C - R - C_{res} - E_{res} - E_{SW} - E_{dif} \quad (2-1)$$

Hvor:

<i>S</i>	varmelagring
<i>M</i>	metabolisme/stoffskifte
<i>W</i>	ytre arbeid
<i>K</i>	varmetap ved konduksjon
<i>C</i>	varmetap grunnet konveksjon
<i>R</i>	varmetap grunnet stråling
<i>C_{res}</i>	varmetap gjennom respirasjon(konvektivt)
<i>E_{res}</i>	varmetap gjennom respirasjon(fordamping)
<i>E_{SW}</i>	Varmetap gjennom fordamping av svette
<i>E_d</i>	Varmetap grunnet diffusjon gjennom huden

At man har oppnådd varmebalanse er ikke synonymt med å være i termisk komfort med sine omgivelser. Spesielt vil et menneske finne det ukomfortabelt å finne varmebalanse ved å utligne høy lufttemperatur med høy svetteproduksjon. Varmebalanseligningen er derfor ikke nok for å kunne beregne termisk komfort. Svetteproduksjon og overflatetemperatur på huden må også tas i betraktning.

Metabolismen

Metabolismen(stoffskiftet) viser til de kjemiske prosessene som fører til at energi omsettes i kroppen, og er grunnen for at vi utveksler varme med omgivelsene. Metabolismen er sammensatt av både den indre varmeproduksjonen, samt aktivitetsnivået til personen. Utfører en person krevende fysisk arbeid, krever det høyere omsetning av energi i kroppen, og derfor høyere metabolisme. Metabolsk rate, er avhengig av aktivitetsnivået til personen, og måles i mengde Watt per m² hudoverflate, eller i enheten met. I anneks B, NS-EN ISO 7730:2005 er det oppgitt verdier for den metabolske raten ved ulike aktiviteter, og et par eksempler er vist i tabell 2-1. Hudoverflaten til et menneske kan beregnes gjennom DuBois Areal, beregnet etter formel 2-2. Formelen er hentet fra boka ENØK, side 133(NTNU, 2007).

Tabell 2-1 Metabolsk rate for ulike aktiviteter

Aktivitet	Metabolsk rate	
	W/m ² hudoverflate	met
Sovende	46	0.8
Stillesittende aktivitet(kontor, skole)	70	1.2
Gå(5 km/t)	200	3.4

Formel for duBois-areal (A_s):

$$A_s = 0.2 \times m^{0.425} \times h^{0.725} \quad (2-2)$$

Hvor:

m vekt i kg
 h høyde i meter

Varmetap ved konduksjon

Gjennom direkte kontakt med andre overflater transporteres varme. Uten fottøy ville varmetap til gulvet vært et problem, men gjennom bruk av fottøy minskes denne effekten. Andre aktuelle eksempler er varmeoverføring for en sittende person til stolen hen sitter på.

Varmekonduktiviteten til materialet av den berørte overflaten har her mye betydning, og en stol av tre vil lede mindre varme enn en stol i stål. Verdier for isolasjonskvaliteten til stolmaterialer er gitt i tabell C.3. i ISO7730:2500. Denne verdien legges til isolasjonsfaktoren fra bekledning (clo) som beskrives i eget kapittel.

Varmetap grunnet konveksjon

Konveksjon viser til varmeoverføring ved hjelp av en fluid, slik som gass (luft). Når lufta stryker langs huden foregår det varmetransport, avhengig av luftas temperatur, hastighet og

personens bekledding. Ved lave lufthastigheter vil det oppstå naturlig/fri konveksjon, hvor forskjeller i temperatur, med bakgrunn i luftas densitet er drivkraft. Ved ventilasjon med luftskifte gjennom vifter vil man oppnå høyere lufthastigheter, og da snakker vi om tvunget konveksjon hvor luftas hastighet er styrende for varmetapet.

Varmetap grunnet stråling

Sola sender ut elektromagnetiske stråler, som vi kan absorbere som varme. I likhet med sola sender alle objekter ut stråling, og slik som strålene fra sola varmer, kan også kalde overflater føre til varmetap. Varmetap til vindusoverflater er her et klassisk eksempel. Overflaten til objektet vil ha mye å si for hvor mye stråling som absorberes.

Varmetap gjennom diffusjon gjennom huden og fordamping av svette

Fordamping av svette er en av de viktigste mekanismene for varmeregulering ved høye temperaturer, eller høyt aktivitetsnivå. Lufthastigheten og luftfuktigheten spiller også inn. Varmetap gjennom diffusjon gjennom huden og oppvarming av respirasjon er av mindre betydning enn fordampingen av svette.

Som beskrevet vil bekledding, lufttemperatur, lufthastighet og den relative luftfuktigheten påvirke varmetapet til en person. Disse faktorene er derfor beskrevet videre i de neste kapitlene.

Bekledding (Clo):

Hvor godt bekleddingen isolerer avhenger av flere ulike faktorer; materiale, drapering osv. I ISO 7730:2500, anneks A4 er det beskrevet typisk innendørs bekledding for vinter og sommersesongen. Disse verdiene er gjengitt i tabell 2-2.

Tabell 2-2 Isolasjonsverdier for ulike typer bekledding

Sesong	Bekledding	Clo
Sommer	Underbukse, skjorte med korte ermer, lette bukser, tynne sokker og sko	0.5
Vinter	Underbukse, skjorte, jakke, bukse, strømper og sko	1.0

Lufttemperatur

I følge Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2017d) er lufttemperaturen det viktigste målet for termisk inneklima. Lufttemperaturen i rommet vil påvirkes av varmetap gjennom bygningskroppen, varmetilskudd gjennom sol og interne varmekilder, og typen ventilasjon. Finnes det store strålingskilder i rommet vil ikke lufttemperaturen være nok for å beskrive de termiske omgivelsene, og operativ temperatur må benyttes. I Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2017d) er operativ temperatur definert som et konstruert temperaturmål som kombinerer effekten av

lufttemperaturen og strålingsutvekslingen med omgivende flater. Ved optimal operativ temperatur vil man være i nøytral termisk komfort, altså hverken for kald eller for varm. Typiske verdier for optimal operativ temperatur gitt bekleddning og aktivitetsnivå er hentet ut fra figur 2-1 og oppgitt i tabell 2-3. Som vi ser i tabellen vil typisk innendørs sommerbekleddning (0.5 clo) gi en optimal operativ temperatur på 25 grader, som er 4 grader varmere enn optimal temperatur gitt standard innendørs vinterbekleddning (1 clo).

Formel for beregning av operativ temperatur:

$$T_{op} = 0.5 \times (T_{mr} + T_L) \quad (2-3)$$

Hvor:

T_{mr} Middel strålingstemperatur
 T_L Lufttemperatur

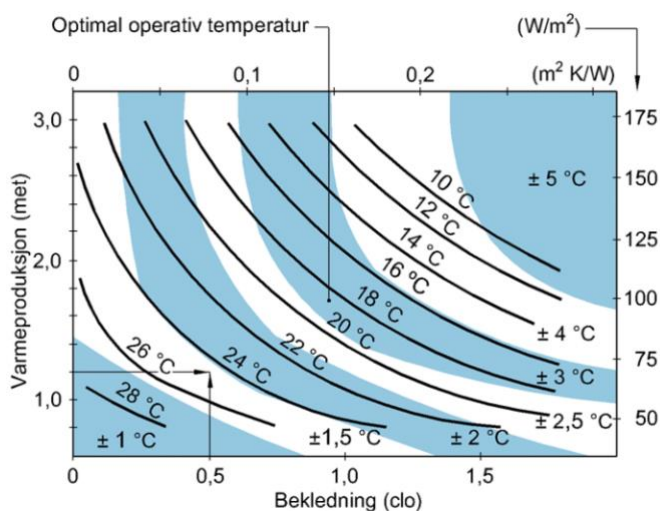
Å beregne den gjennomsnittlige strålingstemperaturen i et rom er komplekst, og er en verdi som ikke er konstant over tid. Strålingen i rommet avhenger av varmekildene i rommet, av materialene, og av varmen gjennom vindusflater som kommer an på tid på året og tid på dagen.

Ligning for å beregne MRT:

$$T_{mr} = \frac{T_1 A_1 + T_2 A_2 + \dots + T_N A_N}{(A_1 + A_2 + \dots + A_N)} \quad (2-4)$$

Hvor:

T_{mr} Middel strålingstemperatur
 T_1 Temperatur på overflate nummer 1
 A_1 Areal til overflate nummer 1



Figur 2-1 Optimal operativ temperatur som funksjon av aktivitet og bekleddning (Sintef Byggforsk, 2017d)

Tabell 2-3 Optimal temperatur for stillesittende aktivitet sommer og vinterstid

Clo	Met	Operativ temperatur
0.5	1.2	25
1	1.2	21

Luftfuktighet

For å beskrive mengde vanndamp i inneluft brukes gjerne begrepet relativ luftfuktighet (RF). Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2017d) definerer relativ luftfuktighet som forholdet mellom vanndampens partialtrykk og metningstrykk ved samme temperatur. Den sier altså noe om hvor mye vann luften inneholder sammenlignet med hvor mye den maksimalt kan inneholde ved samme temperatur. Jo lavere temperatur, jo mindre vann kan luften maksimalt inneholde. Ettersom lufttemperaturen ute endres over sesongen, og over døgnet, vil dette bety at fuktigheten i inneluften også vil variere. På vinterstid varierer RF innendørs gjerne mellom 20 og 40%, og mellom 20 og 60% om sommeren. Fuktigheten inne vil også påvirkes av den interne fuktproduksjonen, fra for eksempel respirasjonen til mennesker og aktiviteter som omhandler fukt slik som matlaging og dusjing.

I boka ENØK (NTNU, 2007) vises det til studier ved moderate lufttemperaturer som viser at RF kan svinge mellom 20 og 70% uten at det påvirker den termiske komforten. Ved ytterpunktene på skalaen, både for lufttemperatur og fuktighet vil derimot komfort påvirkes i større grad. Lav temperatur og luftfuktighet vil ha en forsterkende effekt på kaldhetsfølelse, da fordamping av svette skjer i raskt tempo. Ved høy temperatur og høy luftfuktighet vil det motsatte skje, og varmeubehaget til personen forsterkes. Ytterpunktene på skalaen, både lave og høye har også andre negative effekter på inneklima. Ved lave verdier trives virus, bakterier som fører til større sannsynlighet for virusinfeksjoner og ubehag ved uttørring av slimhinner. Ved høye verdier trives husstøvmidd, og problemer med muggvekst kan forekomme. I tillegg øker emisjonen fra materialer med den relative luftfuktigheten i rommet. RF mindre enn 20% er ansett som svært tørt. I følge Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2005b) er det sjeldent RF i skoler er under 20%. De fraråder bruk av luftfukting gjennom ventilasjonsanlegg grunnet stor risiko for mikrobiell vekst grunnet feil i drift.

Lufthastighet

Lufthastighet påvirker den konvektive varmeutvekslingen, og både stor og lav lufthastighet er forbundet med dårlig komfort. Høy lufthastighet kan oppleves som trekk, altså en lokal nedkjøling av kroppen, og lav lufthastighet er synonymt med lavt luftskifte, og oppleves dermed ofte som ubehag i form av for høye CO₂-nivåer. Lokal termisk diskomfort er beskrevet i kapittel 2.1.3. Anbefalt lufthastighet oppgitt av Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2005a), er 0.15 m/s på vinterstid og 0.2 m/s om sommeren.

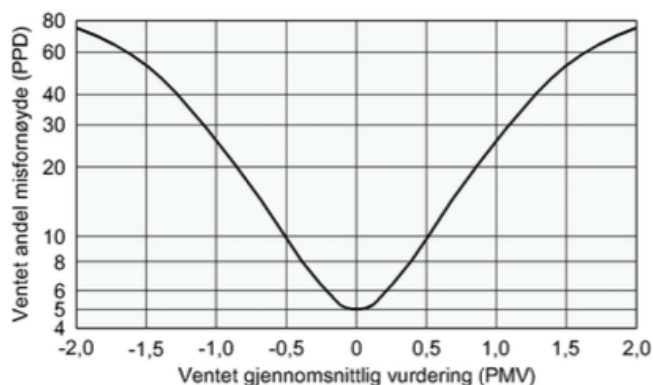
2.1.2 PMV og PPD

PMV indeksen består av en skala fra -3 til +3, gjengitt i tabell 2-4. Den forteller hvordan det termiske miljøet vil oppfattes på et psyko-fysisk nivå. Altså om man opplever det som nøytralt, og hverken for kaldt eller for varmt, eller om man vurderer det som ubehagelig i den ene eller andre retningen. Som beskrevet tidligere er den basert på komfortligningen, og påvirkes derfor av aktivitet, bekledding, lufttemperatur, strålingstemperatur, lufthastighet og luftfuktigheten til omgivelsene.

Tabell 2-4 PMV- oversikt, tabell gjengitt etter figur fra Bygningsfysikk (2015)

PMV-verdi	Vurdering av tilstanden
3	Altfor varmt, hett
2	For varmt
1	Litt for varmt
0	Nøytralt
-1	Litt for kaldt
-2	For kaldt
-3	Altfor kaldt

Sammenhengen mellom PMV og PPD er vist i figur 2-2. Er PMV til et rom nøytral (0), vil PPD være 5%. Dette er grunnet menneskers individuelle ulikheter, som nevnt tidligere i kapittelet. Det kan med andre ord aldri være mer enn 95% som er tilfreds med den termiske komforten i et rom.



Figur 2-2 Sammenheng PMV og PPD(Sintef Byggforsk, 2017d)

2.1.3 Lokal termisk diskomfort

Fra definisjonen av termisk komfort, vet vi at det er en tilstand hvor vi opplever **full** tilfredshet med de termiske omgivelsene. Lokal termisk diskomfort må derfor tas med i betraktningen. Årsaken til lokalt ubehag kan være strålingsasymmetri eller vertikale temperaturforskjeller grunnet trekk, eller for kalde/varme gulv. Lokal termisk diskomfort er beskrevet i NS-EN ISO 7730:2005 (Standard Norge, 2006).

Trekk

Trekk er definert som en uønsket lokal nedkjøling grunnet luftbevegelser (Thue, 2016). Luftbevegelse kan ha ulike drivkrefter, som for eksempel trykkforskjeller fra oppdrift, vind, eller mekanisk ventilasjon. Med oppdrift mener vi prosessen hvor varm luft stiger, og kald luft synker grunnet forskjeller i densitet. Et eksempel hvor temperaturforskjeller er årsak til trekk er kaldras fra vinduer. Da er forskjellen mellom inneluftas temperatur og temperaturen til glassoverflaten så stor at det fører til nedadgående strømning, som kan skape trekkproblemer ved gulvet. Hvis differansen mellom målt temperatur ved ankel og hodehøyde er for stor vil dette oppleves ubehagelig. For stillesittende personer skal derfor temperaturen måles i tre ulike punkter; ved 0.1, 0.6 og 1.1 meter, hvor temperaturforskjell mellom ankel og hode skal være mindre enn 3 grader (Helsedirektoratet, 2014).

Strålingsasymmetri

Stor temperaturdifferanse mellom temperaturen på hudoverflaten og temperaturen til omgivende overflater kan skape ubehag gjennom strålingsutveksling. Store glassflater, hvor både for varm stråling fra sola, eller kulde fra kald glassoverflate kan skape ubehag.

Varme/kalde gulv

Lokal termisk diskomfort grunnet varme eller kalde gulv er i stor grad knyttet til bruken av bygningen, og bruk av fottøy. I en barnehage vil mye aktivitet foregå i kontakt med gulvet, og temperaturen til gulvet vil derfor ha betydning. På skoler og kontor vil bruken av skotøy begrense varmetapet gjennom konduksjon til gulvet, og kalde gulv vil derfor ikke være et problem.

2.1.4 Krav til termisk komfort

For krav til termisk komfort i byggverk henviser norsk lov til forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK). For skoler gjelder også forskrift om miljørettet helsevern (Lovdata, 1995). Forskriftene oppgir minimumskrav eller anbefalinger og henviser til bruk av Norsk standard for dokumentasjon av oppnåelse. I forskriftene og standardene brukes ulike enheter som mål på termisk komfort. Forskriftene bruker i hovedsak operativ temperatur som mål, mens standardene benytter i større grad PMV- og PPD indeksene. Hvilket mål som benyttes i standardene avhenger av typen ventilasjon i bygningen, og om det er naturlig eller mekanisk ventilasjon.

Teknisk forskrift (TEK)

TEK er bygget opp rundt funksjonskrav og ytelser (Direktoratet for Byggkvalitet (DiBk), 2017). Funksjonskrav viser til overordnede formål eller oppgaver som skal oppfylles, mens ytelser er minstekrav for oppnåelse. I TEK behandles temaet inneklime i kapittel 13. I §13-4, er det gitt følgende funksjonskrav:

(1) Termisk inneklime i rom for varig opphold skal tilrettelegges ut fra hensynet til helse og tilfredsstillende komfort ved forutsatt bruk.

Som ytelse oppgir forskriften grenseverdier for operativ temperatur (se tabell 2-5). Det er videre anbefalt en øvre lufttemperatur på 22 grader i fyringssesongen grunnet energibruk. De samme verdiene som nevnt ovenfor brukes også av Arbeidstilsynet.

Tabell 2-5 Anbefalte verdier for operativ temperatur fra TEK

Aktivitetsgruppe	Lett arbeid	Middels arbeid	Tungt arbeid
Temperatur [C]	19-26	16-26	10-26

Forskrift om miljørettet helsevern

For skoler og barnehager eksisterer det i tillegg en forskrift om miljørettet helsevern. Denne trådte i kraft 1. januar 2012 som del av den nye folkehelseloven. Forskriften er kommunenes ansvar, og er forankret i kommunehelsetjenesteloven. Kapittel III, § 19 i forskriften er dedikert til temaet Inneklime og luftkvalitet (Lovdata, 2012). Der står det:

Virksomheten skal ha tilfredsstillende inneklime, herunder luftkvalitet.

Temperaturregulering og ventilasjon skal være tilpasset bruksområdet og årstidsvariasjoner.

Den relative luftfuktighet i rommene må ligge på et slikt nivå at fare for muggdannelse ikke forekommer. Ioniserende stråling skal ikke overskride et allment akseptert nivå.

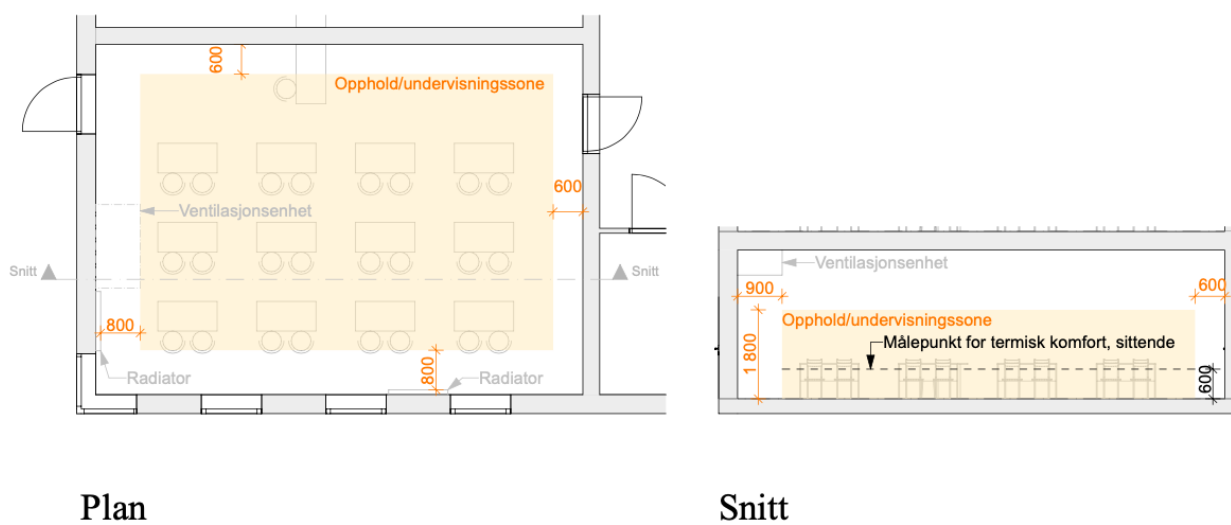
I veileder IS-2073 (Helsedirektoratet, 2014), er det oppgitt følgende grenseverdier:

Tabell 2-6 Grenseverdier fra IS-2073

Faktorer	Grenseverdier
Romtemperatur	Mellom 20–24 C om vinteren og 23–26 C om sommeren. Overskridelser kan godtas om sommeren, men helst ikke over mer enn 2 uker
Gulvtemperatur	19–26 C
Vertikaltemperatur	3 C pr høydemeter
Luftkvalitet	Karbondioksidnivå (CO ₂) bør ikke overskride 1800 mg CO ₂ / pr m ³ eller 1000 ppm CO ₂ i oppholdsrom
Lufthastighet	0,15 m/s som middelhastighet over 3 minutter i undervisningsrom skal ikke overskrides

SINTEF Byggforsk

Krav for termisk komfort vil ikke gjelde for rommet i sin helhet, men innenfor en definert sone kalt oppholdssonen. SINTEF Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2017d) definerer sonen vertikalt som området fra gulv og til en høyde på 1.8 m. Horisontalt er sonen arealet som gjenstår etter at man har trukket fra 0.6 m fra vegg. I tillegg til oppholdssonen har undervisningssoner egne krav, og spesielt med tanke på avstand til strålingskilder som vinduer og varmekilder, samt fra utkast til ventilasjonsanlegg(Sintef Byggforsk, 2005b). Denne avstanden skal være 0.8 m. Figur 2-3 illustrerer disse forholdene. Definisjon av oppholdssone samsvarer med hva som angis i standardene.



Figur 2-3 Oppholdssone/undervisningssone

NS-EN 16798-1:2019 og SN-CEN/TR 16798-2:2019

Innenfor kategorien innemiljø er det et stort spenn av ulike standarder som man må holde styr på. Selv om en annen standard (NS-EN 15251:2007+NA:2014) var gjeldende ved oppføringen av case-bygningen i denne oppgaven vil termisk komfort bli målt opp mot kategorier satt i NS-EN 16798-1:2019, ettersom denne har erstattet standarden fra 2014, og er gjeldende standard i dag. Den tekniske rapporten SN-CEN/TR 16798-2:2019 er gitt som veiledning til bruk av NS-EN 16798-1:2019.

Kriterier for kvalitet på innendørs miljø er definert i kapittel 6.1, tabell 3 i SN-CEN/TR 16798-2:2019. Tabellen er oversatt til norsk og gjengitt her som tabell 2-7. IEQ står for indoor environmental quality, og brukes til å kartlegge kvaliteten på de fire parameterne; luftkvalitet, termisk komfort, lys og akustikk. Det er ikke meningen at en bygning bare skal operere innenfor en av kategoriene, men ved å kartlegge fordelingen av tiden innenfor hver kategori kan bygningen evalueres. For nye skoler er kategori IEQ_{II} mest hensiktsmessig å ligge innenfor, men begrensede perioder i kategorier med lavere forventningsnivå må aksepteres. Hvor mange timer innenfor kategorier med lavere forventningsnivå kommer helt an på prosjektet og bruken. I følge Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2005b) vil 25 brukstimer med en operativ temperatur på over 26 være uakseptabelt.

Tabell 2-7 Kategorier etter SN-CEN/TR 16798-2:2019

Kategori	Forventningsnivå	Forklaring
IEQ _I	Høyt	Anbefalt i rom der det oppholder seg svært sensitive og sårbare personer med spesielle behov, som syke, spedbarn og gamle
IEQ _{II}	Medium	Normalt nivå som bør brukes i nye og oppgraderte bygninger.
IEQ _{III}	Moderat	Gir akseptabelt nivå, men risiko for noe redusert prestasjon hos brukere.
IEQ _{IV}	Lavt	Burde brukes i et svært kort tidsrom i løpet av året, og i rom hvor oppholdstid er svært begrenset.

Ved prosjektering av nybygg har ventilasjonsstrategien til bygningen mye å si for hvilke kriterier som skal legges til grunn for den termiske komforten i bygningen. I en mekanisk ventilert bygning kan PMV og PPD-indeksene benyttes for å kartlegge termisk komfort, men hvis bygningen er naturlig ventilert skal såkalt «adaptivt kriterium» legges til grunn. Her er det gitt at brukerne selv har mulighet til å påvirke sin egen termiske komfort gjennom vinduslufting og justering av bekledding. Forskning viser at brukernes subjektive opplevelse av termisk komfort påvirkes av mulighet til å endre det termiske miljøet. I en naturlig ventilert bygning sies det at man er mer «tilgivende» innstilt, og derfor kan tåle større variasjon i innetemperatur.

I et kontorlandskap eller klasserom vil denne påvirkningen være noe begrenset, ettersom personer i senter av rommet ikke vil ha direkte tilgang til vindu.

For klassifisering og sertifisering av kvaliteten på innemiljøet står det i annek G, i SN-CEN/TR 16798-2:2019 at det er mulig å bruke fire ulike metoder;

- a) ved bruk av kriterier til energiberegninger (for nye bygninger), se tabell 2-10
- b) ved bruk av simuleringer over et år, som både simulerer innemiljø og energieffektivitet (nye og eksisterende bygninger)
- c) langvarig måling av utvalgte parametere i innemiljøet (eksisterende bygning)
- d) subjektive svar fra brukere (eksisterende bygninger)

Tabeller brukt til klassifisering er vist i tabell 2-8 til 2-10. Tabell 2-8 er en kombinasjon av tabell B.1 og B.3 i NS-EN 16798-1:2019, som angir grenseverdier for PMV og PPD for mekanisk oppvarmede og nedkjølte bygninger. Tabell 2-9 angir designkriterier for lokal termisk diskomfort og tabell 2-10 angir temperaturintervaller brukt til klassifisering i energiberegninger. I standarden er det beskrevet at intervall for vinter skal brukes for klassifisering når «running mean outdoor temperature (θ_{rm})» er under 10, og klassifiseringen for sommer benyttes når θ_{rm} er mer enn 15.

Formel for beregning av θ_{rm} :

$$\theta_{rm} = \frac{\theta_{ed-1} + 0.8 * \theta_{ed-2} + 0.6 * \theta_{ed-3} + 0.5 * \theta_{ed-4} + 0.6 * \theta_{ed-5} + 0.7 * \theta_{ed-6} + 0.8 * \theta_{ed-7}}{3.8} \quad (2-5)$$

Hvor:

θ_{rm} Løpende utendørs gjennomsnittstemperatur

θ_{ed-1} Forrige dags gjennomsnittstemperatur

Tabell 2-8 Grenseverdier for PMV og PPD(Standard Norge, 2019)

Kategori	Termisk tilstand for kroppen		Lokal termisk diskomfort angitt i %			
	PPD (%)	PMV	Trekk	Vertikal luftforskjell (hode-ankel)	Varmt eller kaldt gulv	Strålingsasymmetri
I	< 6	-0.2 < PMV < +0.2	< 15	< 3	< 10	< 5
II	< 10	-0.5 < PMV < +0.5	< 20	< 5	< 10	< 5
III	< 15	-0.7 < PMV < +0.7	< 25	< 10	< 15	< 10
IV	< 25	-1 < PMV < +1		-	-	-

Tabell 2-9 Krav og grenseverdier for lokal diskomfort(Standard Norge, 2019)

Kategori	Vertikal lufttemperatur-differanse		Gulvets overflate-temperatur (C)	Strålingsasymmetri(K)			
	PPD (%)	(K)		Varmt tak	Kaldt tak	Kald vegg	Varm vegg
I	3	< 2	19-29	< 5	< 14	< 10	< 23
II	5	< 3	19-29	< 5	< 14	< 10	< 23
III	10	< 4	17-31	< 7	< 18	< 13	< 35

Tabell 2-10 Anbefaling for temperatureintervall på vinter og sommer tid i klasserom. I tiden mellom vinter og sommer kan verdiene mellom sommer og vinter benyttes. Utdrag fra tabell B.5(Standard Norge, 2019)

Kategori	Temperaturintervall vinter (1 clo, 40% RF)	Temperaturintervall sommer (0.5 clo, 60% RF)
I	21.0 – 23.0	23.5 – 25.5
II	20.0 – 24.0	23.0 – 26.0
III	19.0 – 25.0	22.0 – 27.0
IV	17.0 – 25.0	21.0 – 28.0

2.1.5 Betydningen av termisk komfort og godt inneklima

At termisk komfort er en tilstand av full tilfredshet med det termiske klima, viser til en tilstand av velvære. At vi trives, kan videre knyttes til vår generelle helse. I 1946 definerte Verdens helseorganisasjon (WHO) begrepet helse slik:

Helse er en tilstand av fullstendig fysisk, psykisk og sosialt velvære og ikke bare fravær av sykdom eller lidelse.

Av denne definisjonen forstår man at helse er et mer sammensatt begrep enn bare det som har med det rent kroppslige å gjøre, og at mange ulike faktorer spiller inn. I Norden er andelen tid tilbrakt innendørs svært høy, og i Norge er det anslått at vi tilbringer hele 95 % av tiden innendørs (Sintef Byggforsk, 2006). Med så lang tid for mulig eksponering, vil effekten av termisk komfort (og de andre parameterne som utgjør inneklimaet) på trivsel og helse være av stor betydning. I tillegg til termisk komfort består inneklimaet av atmosfærisk, akustisk, aktinisk og mekanisk miljø.

I følge Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2017b) kan dårlig inneklima bidra til utvikling av sykdom og forverring av eksisterende sykdom. At mennesker opplever helseplager spesielt tilknyttet tiden innendørs i en bygning har blitt et eget syndrom, og kalles sykt bygg syndrom (SBS). Dette kan være plager som hodepine, tretthet, problemer med konsentrasjonen, og irritasjon i slimhinner og luftveier. SBS er spesielt koblet mot bygninger med mekanisk ventilasjon, og er videre beskrevet i kapittel 2.3.

Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2006) sier også at dårlig inneklima kan resultere i

overfølsomhet, samt å skape allergiske reaksjoner. I følge Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2005b) har rundt 30% av befolkningen astma eller allergilignende plager. Mange vokser dette av seg med alderen, og andelen personer med allergi hos barn er svært høy. Barn er ellers ekstra sårbare ettersom kroppen ikke er ferdig utviklet, og immunsystem og lunger er under utvikling (FHI, 2016).

Allergener er spesielt knyttet til inneklima med høy fuktighet. For eksempel trives både husstøvmidd og muggsopp ved høy luftfuktighet (75-80%). I motsatt ende av fuktighetsskalaen kan tørr luft føre til større sjanse for luftveisinfeksjoner.

Kognitiv prestasjon

I tillegg til at inneklimaet påvirker trivsel og helse, påvirker den også læring og arbeidsprestasjon. Mange studier understøtter til eksempel at kognitivt arbeid påvirkes negativt av økt temperatur. Her har både prestasjoner på kontor og i skoler blitt undersøkt.

I en metastudie (Wargoeki et al., 2019) undersøkes 18 studier hvor relasjonen mellom lufttemperaturen i klasserom og elevenes prestasjoner måles. Metastudien konkluderer med at prestasjonen til elevene har en forbedring på 20% når temperaturen reduseres fra 30 grader til 20 grader, og at temperatur for optimal prestasjon ligger på under 22 grader. Det blir også trukket frem at optimal temperatur for læring og kognitivt arbeid vil ligge noe lavere for barn, ettersom de har 15-20 % høyere metabolsk rate enn voksne. Dette bekreftes av nyere studier.

I spørsmålet om prestasjonene er knyttet til termisk komfort eller til temperatur, ble det i Lan et al. (2022) stadfestet at selv om man justerer bekledningen for å oppnå termisk komfort ved en høyere temperatur så vil likevel den kognitive prestasjonen være svekket. Dette forsterker relasjonen mellom høye temperaturer og svekket kognitiv prestasjon.

Inneklima på skoler

Tiden tilbrakt på skolebenken vil også utgjøre en stor andel av en persons liv til slutt. At barn er ekstra sårbare for påvirkning fra inneklimaet, gjør at det må stilles strengere krav til skoler enn i bygninger ellers. Krav til innemiljø for skoler er beskrevet i norsk lov, under lova om grunnskolen og opplæring (opplæringslova), § 9 A-7(Lovdata, 1998). Der står det (uttak fra loven, omskrevet til bokmål):

Skolene skal planlegges, bygges, tilrettelegges og drives slik at det blir tatt omsyn til tryggleiken, helsa, trivselen og læringa til elevene. Det fysiske miljøet i skolen skal være i samsvar med de faglige normene som fagmyndighetene til kvar tid tilrår. Dersom enkelte miljøtilhøve avvik fra disse normene, må skolen kunne dokumentere at miljøet likevel har tilfredsstillende verknad for helsa, trivselen og læringa til elevene.

Selv med strenge krav viser en kartlegging utført av TNS Gallup (TNS Gallup, 2008) for Utdanningsdirektoratet i 2008 at få skoler er godkjent etter forskrift om miljørettet helsevern, og ingen tilgjengelig statistikk over godkjenning har blitt publisert siden. Derfor, for å få en indikator på tilstanden til inneklimate i norske skoler er det sett på statistikk fra STAMI (STAMI, 2019). STAMI utfører statistikk på arbeidsmiljøforhold som har konsekvenser for helsen til yrkesaktive. Data kategoriseres etter tema, deriblant inneklimate. Med dårlig inneklimate menes det i denne statistikken at man i sin normale arbeidshverdag utsettes for dårlig inneklimate i form av trekk, dårlig ventilasjon, tørr luft eller andre former for dårlig inneklimate. med statistikk over klager på dårlig inneklimate. Ettersom denne oppgaven fokuserer på inneklimate på skoler vil statistikk fra yrkesgruppen grunnskolelærere være relevant. I statistikken er norske arbeidsgrupper (NOA) benyttet, som er en inndeling med 47 ulike yrkesgrupper. I statistikken over dårlig inneklimate svarer 44 % av grunnskolelærere at de har dårlig inneklimate. Av de 47 representerte yrkesgruppen ligger altså grunnskolelærere som nummer tre, hvor bare sykepleiere og andre helserelevante yrker har det verre. STAMI har også en oversikt hvor dårlig ventilasjon skiller ut som egen post. Her er grunnskolelærere verst, hvor 35% melder om dårlig inneklimate i form av dårlig ventilasjon.

2.1.6 Formler til simulering av luftstrøm og termisk komfort i SIMSCALE

Formler som er brukt til å beregne inputverdier i SIMSCALE er oppgitt i dette delkapittelet.

Formel for beregning av overflatetemperatur på vindu (proporsjonalitetsformelen):

$$\frac{\Delta\theta_{si}}{\Delta\theta_{tot}} = \frac{R_{si}}{R_{tot}} \quad (2-6)$$

Hvor:

R_{si} varmeovergangsmotstanden til innvendig luftsjikt

R_{tot} varmemotstanden til glasset

$\Delta\theta_{si}$ Temperaturdifferanse over innvendig luftsjikt

$\Delta\theta_{tot}$ Temperaturdifferanse over glasset

Formel for beregning av varmestrøm(q) gjennom vindu:

$$q = \Delta t \times h \quad (2-7)$$

Hvor:

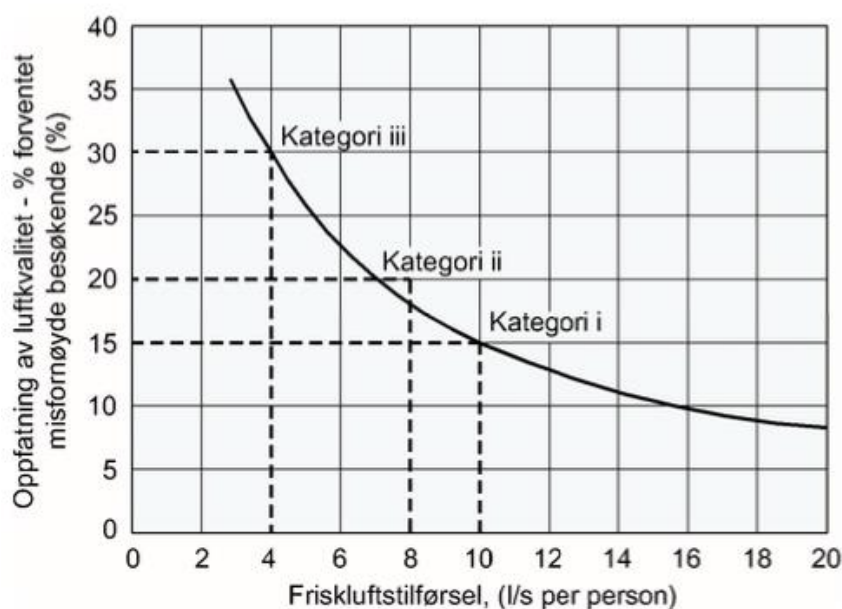
Δt temperatur differanse over konstruksjonsdel

h varmeovergangstall (U-verdi)

2.2 Ventilasjon

Målet med ventilasjon i bygninger er å sikre gode levestandarder, gjennom tilfredsstillende luftkvalitet og akseptabel termisk komfort. Som levende organismer flest, er mennesker avhengig av oksygen for å danne energi. Som et restprodukt fra denne prosessen forurenses luften av CO₂. Konsentrasjonen til denne forurensningen, i tillegg til avgassing fra bygningsmaterialer, møbler og installasjoner er vi interessert i å redusere.

Fra kapitlet om termisk komfort forstår vi at ventilasjonsløsning har mye å si for den termiske komforten i en bygning. Lufttemperatur, lufthastighet og luftfuktighet er alle parametere som kan styres gjennom ventilasjon. Fra Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2017a) er følgende sammenheng mellom frisklufttilførsel per person og PPD angitt (se figur 2-4):



Figur 2-4 Sammenheng mellom frisklufttilførsel per person og PPD (Sintef Byggforsk, 2017a)

Som forklart i kapittel 2.1.5 vil også typen ventilasjon, med bakgrunn i mulighet for tilpasning, påvirke selve oppfatningen av termisk komfort.

2.2.1 Ventilasjonstyper

Ventilasjonssystemer kan kategoriseres ut ifra flere kategorier; drivkraft, tilførselsmåte, type luftfordelingssystem eller etter funksjon. Hvis vi tar utgangspunkt i drivkraften for luftskiftet, kan vi kategorisere ventilasjonssystemer i to ulike kategorier; naturlig og mekanisk. I et naturlig ventilasjonssystem er drivkraften vind og oppdrift grunnet trykk- og temperaturforskjeller. Ved lite vind eller liten temperaturforskjell mellom inne og ute vil det altså være minimalt luftskifte.

Tilførsel av luft ved naturlig ventilasjon skjer gjennom utettheter i bygningskroppen, ventiler i yttervegg og gjennom vinduslufting. Mekanisk ventilasjon sikrer luftskifte med bruk av vifter som drivkraft. Vifter som kan gjenvinne varmen fra avtrekksluften kan bidra til energisparing. For mekanisk ventilasjon skiller det mellom to ulike styringsmuligheter; konstant (CAV) eller behovsstyrt lufttilførsel (DCV). Et ventilasjonssystem med konstant lufttilførsel har en fast styringsplan, og vil altså ha samme tilførsel av luft uansett personbelastningen i rommet. En behovsstyrt lufttilførsel er gjerne styrt av Co₂ nivå, lufttemperatur eller luftfuktighet.

Ved balansert mekanisk ventilasjon brukes det i hovedsak to ulike metoder for å fordele luft, omrøring- og fortreningsventilasjon. Omrøringsventilasjon tilfører luft med høy hastighet i et område utenfor oppholdssonen, typisk i øvre del av rommet. Når luften passerer utkastet vil Coanda-effekten føre til at luftstrålene kleber seg til himlingen og på den måten få tid til å varmes opp, samt få redusert lufthastigheten før den kommer inn i oppholdssonen. Definisjon av oppholdssone er gitt i figur 2-3. Fortreningsventilasjon tilfører luft med mye mindre hastighet direkte inn i oppholdssonen, gjerne gjennom spalter i gulvet.

Som en mellomting mellom mekanisk og naturlig ventilasjon finnes hybride løsninger, eller mixed-mode ventilasjon. Her utnyttes naturlige drivkrefter når det er mulig, i kombinasjon med mekanisk ventilasjon når naturlig oppdrift ikke sikrer tilstrekkelig luftskifte. For at løsningen skal anses som hybrid må de naturlige drivkreftene benyttes bevisst.

Desentral ventilasjon

Desentrale løsninger kan se forskjellige ut, og har ikke sentrale kanalsystemer, men heller luftveier som i større grad er integrert i selve bygningskroppen. Løsningen brukes ofte i rehabiliteringsprosjekter hvor etasjehøyde ikke muliggjør sentrale systemer. Positive konsekvenser som enklere vedlikehold og drift, mindre støy fra anlegg, mindre helseplager hos brukere knyttet til SBS (sykt bygg syndrom) og økt tilfredshet hos brukerne grunnet større mulighet for brukerpåvirkning er nevnt hos flere leverandører. Begrepet SBS er i høy grad assosiert med mekanisk ventilasjon (SINTEF, 2001) og omhandler negative helsesyntomer knyttet til eksponeringstiden i inneklimate i en bygning. Eksempel på typiske symptomer er hodepine, tretthet og konsentrasjonsvansker. Dette er symptomer som påvirker evnen til å lære og som kan føre til sykefravær, både på arbeidsplasser og skoler. I en finsk studie (O. Seppanen, 2002) er det observert 30 – 200% flere tilfeller av SBS i kontorbygninger med mekanisk ventilasjon enn i kontorbygninger med naturlig ventilasjon.

Desentral ventilasjon frigjør også areal og volum, grunnet manglende føringer i tak og mindre behov for areal til tekniske systemer. De manglende føringene i taket gjør noe med de romlige kvalitetene. Ekstra areal kan benyttes til andre funksjoner, som til eksempel ekstra grupperom, noe som er verdifullt da barn kan ha særskilte behov og kan trenge tilrettelagt undervisning utenfor selve klasserommet.

2.2.2 Krav til ventilasjon

En skole inngår i kategorien for arbeids- og publikumsbygninger, og etter TEK17 skal en slik bygning tilfredsstillende krav til både frisklufttilførsel etter aktiviteten i bygningen, og ventilasjon av emisjoner fra materialer. Tilluftsmengden er altså summen av A) personbelastning og B) materialbelastning.

Kravene er beskrevet i Byggforskblad 552.311 (Sintef Byggforsk, 2005b) og 421.503 (Sintef Byggforsk, 2017c) og er gitt i tabell 2-11. Disse kravene for TEK10 er uendret i gjeldende forskrift TEK17.

Tabell 2-11 Krav TEK

Krav TEK10		
Belastingstype	Tilluftsmengde i brukstid	Utenfor brukstid
Personbelastning	26 m ³ /h pr person	0 m ³ /h
Materialbelastning	2.5 m ³ /h pr m ² gulvareal	0.7 m ³ /h

For bruk i simuleringer er formel 3-1 brukt til beregning av lufthastighet i ventilasjonsanlegg.

Beregning av lufthastighet:

$$V = c \times A \quad (2-8)$$

Hvor:

V = Volumstrøm [m³/h]

c = lufthastighet[m/s]

A = tverrsnitt

2.3 Bygningers energibruk

En stor andel av en bygnings energibehov går til sikring av termisk komfort gjennom oppvarming, og til sikring av god luftkvalitet gjennom ventilasjon. Resten går til belysning og drift av tekniske systemer. Hvor stor energitilførsel som er nødvendig for oppvarming er avhengig av utvendig klima, utforming og bruk. På tapssiden har vi transmisjonstap, infiltrasjonstap, varmetap fra ventilasjon, og varmetap grunnet tappevann. På plussiden, kan solinnstråling gjennom vinduer og interne varmekilder som mennesker eller tekniske systemer føre til varmetilskudd. De ulike postene som utgjør varmebalansen til en bygning, er beskrevet videre i egne delkapitler.

2.3.1 Varmetap

Transmisjonstap

Når det opptrer temperaturforskjell over en bygningsdel vil det foregå et varmetap i form av transmisjonstap fra høyere til lavere temperaturnivå. Denne varmegjennomgangen er avhengig av isolasjonsegenskapene til materialet og størrelsen på overflaten. For å beskrive bygningsdelers varmegjennomgang, eller isolasjonsegenskap brukes U-verdi. Ligning for U-verdi er gitt gjennom formel 2-9 og 2-10, og er i boka ENØK(NTNU, 2007) definert som følgende:

Varmestrømtettheten gjennom konstruksjonen i stasjonær tilstand når temperaturforskjellen er 1K mellom luft på de to sidene av konstruksjonen.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (2-9)$$

Hvor:

R_T den totale varmekonduktiviteten (varmemotstanden) til materialet [m^2K/W]

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2-10)$$

Hvor:

d tykkelse på sjikt [m]

λ varmekonduktivitet til materialet [W/mK]

Samlet transmisjonstap for bygningen beregnes ved å summere transmisjonstapet til hver av konstruksjonsdelene.

I møtet mellom konstruksjonsdeler med ulik U-verdi vil det forekomme en økt varmefluks, og dette kalles for en kuldebro. Variasjonen i U-verdi kan komme av møter mellom

materialer med ulike egenskaper, ved ulik dimensjon på komponenter av samme material, eller grunnet geometri. I TEK angis krav til normalisert kuldebroverdi, som betegner den totale virkningen fra alle kuldebroer i konstruksjonen delt på bygningens bruksareal (BRA).

Lufttetthet og infiltrasjonstap

Grunnet drivkrefter fra vind, ventilasjonsanlegg eller termisk oppdrift kan det dannes forskjeller i lufttrykket inne som skaper strømming. Uteluft som trenger inn i bygningen gjennom utettheter kalles infiltrasjon, mens inneluft som strømmer ut kalles eksfiltrasjon. En slik gjennomblåsning, med både infiltrasjon og eksfiltrasjon kan føre til varmetap og problemer med trekk og termisk komfort. Lufta som strømmer ut gjennom eksfiltrasjon har ingen varmegjenvinning, og fører til varmetap.

Utetthetene er ofte lokalisert i møtepunkter mellom ulike konstruksjonsdeler, eller gjennom pipeløp og er typisk for eksempel rundt vinduer. For å minske et slikt varmetap er et viktig tiltak lufttetting gjennom bruk av vindsperre. Resultatet av infiltrasjon gjennom bygningskroppen er økte kostnader til oppvarming, og redusert energieffektivitet.

Varmetap grunnet ventilasjon

Varmetapet til ventilasjonen er avhengig av luftmengde og temperaturforskjell mellom ute og inneluft. Gjennom gjenvinning av innelufta kan varmetapet grunnet ventilasjon reduseres. Temperaturvirkningsgraden til anlegget bestemmer hvor stor andel av varmen fra innelufta som gjenvinnes, og kan beregnes etter formel 2-11 (Sintef Byggforsk, 2002)

$$\eta_t = \frac{L_t(t_2 - t_1)}{L_{min}(t_3 - t_1)} \quad (2-11)$$

Hvor:

η_t	temperaturvirkningsgrad til varmeveksler
L_t	tilluftsmengde [m ³ /h]
L_{min}	avtrekksmengde [m ³ /h]
t_1	temperatur uteluft
t_2	temperatur tilluft
t_3	temperatur inneluft

Varmetap grunnet avløpsvann

Energi til oppvarming av vann må også tas med i energiregnskapet til bygninger. Dette varmetapet varierer mye etter type virksomhet i bygningen.

2.3.2 Varmetilskudd

Postene som utgjør internt varmetilskudd i bygninger er presentert i dette kapittelet, og standardverdier for varmeavgivelse i et par ulike bygningskategorier er angitt i tabell 2-12.

Tabell 2-12 Interne varmetilskudd i bygninger

Interne varmetilskudd, utdrag NS 3031:2014, Tabell A2			
Bygningskategori	Belysning [W/m ²]	Utstyr [W/m ²]	Personer [W/m ²]
Småhus/boligblokk	1.95	1.8	1.5
Skole	10	6	12

Varmetilskudd fra sol

Fra de ulike postene som kan føre til varmetilskudd er dette den som kan utgjøre størst forskjell. Varmetilskuddet på sommerstid kan være betydelig, selv i Norge, og føre til besparelser innenfor energi, eller besvær i form av overoppheting og behov for kjøling. Varmetilskudd fra solstråling gjennom ugjennomsiktige overflater ses vanligvis bort ifra, mens ståling gjennom vinduer kan være betydelig. Denne posten er i stor grad avhengig av lokasjon og himmelretning, samt egenskapene til vinduet. Dagens teknologi har utviklet vinduer som begrenser solinnstråling, og som i kombinasjon med solskjerming kan kontrollere varmetilskuddet på en god måte. Mengde solenergi (strålingseffekt) som transmitteres gjennom glasset til innsiden beskrives gjerne av vinduets g-faktor. G-faktoren viser til andelen transmittert strålingseffekt, og tallet varierer derfor mellom 0 og 1.

Varmetilskudd fra mennesker

Som nevnt i kapittel 2.1.1 utveksler mennesker varme med omgivelsene, og har en varmeproduksjon som er avhengig av blant annet aktivitetsnivå. I publikumsbygninger hvor mange mennesker samles over et lengre tidsrom kan det dannes store interne varmetilskudd.

Varmetilskudd fra teknisk utstyr

Varmetilskudd fra tekniske systemer er i stor grad avhengig av virksomheten som drives i bygningen og alder på de tekniske anleggene. Standardverdier for ulike bygningskategorier er gitt i NS 3031:2014, og her gjengitt i tabell 2-12. Et datarom, eller serverrom har mye teknisk utstyr per areal og vil naturlig nok avgi mye varme sammenlignet med de tekniske elementene i et normalt hjem.

Varmetilskudd fra lys

Tidligere var varmetap og varmetilskudd fra belysning høyere, men grunnet utviklingen av LED-teknologi brukes mindre energi på belysning, og belysningen i seg selv avgir mindre

varme. På arbeidsplasser vil kravene til belysning være strenge, og man vil derfor ha et mye høyere internt varmetilskudd fra belysningen i en skole en i en bolig, se tabell 2-11.

2.3.3 Krav innenfor energieffektivitet i bygninger

TEK10/TEK17

For at et bygg skal kunne oppføres lovlig i Norge må det oppfylle minimumskravene satt i byggeteknisk forskrift. Gjeldende forskrift per 2022 er TEK17, som overtok for TEK10 og trådte i kraft 1. juli 2017. Alle bygg prosjektert etter 2018 må følge denne forskriften. Hanstad skole er prosjektert i henhold til TEK10, med dispensasjon på et par områder. TEK10 vil derfor i hovedsak være temaet i dette kapittelet.

Kapittel 14 i forskriften omhandler temaet energi. Energibruken til en bygning kommer an på mange ulike faktorer. Eksempel på faktorer som spiller inn er geografisk plassering og klima, oppvarmingssystem og bruk, konstruksjon og materialvalg. I TEK er det beskrevet to ulike metoder for å dokumentere energiytelsen til bygninger. For boliger og småhus kan man velge mellom energitiltaksmetode eller energiramme, mens for andre bygningskategorier må energiramme benyttes. Energiramme viser til rammeverdier for totalt netto energibehov, målt i kWh/m² oppvarmet BRA pr. år. Kravene for de tre kategoriene av undervisningsbygg er vist i tabell 2-13. Alle tre verdier for energiramme ble nedjustert i TEK17, og for kategorien grunnskole ble kravet endret fra 120 til 110 [kWh/m² oppvarmet BRA pr. år].

Tabell 2-13 Energirammekrav fra TEK10

Energiramme [kWh/m ² oppvarmet BRA pr. år]			
Bygningskategori	Barnehage	Grunnskole	Universitet og høgskole
TEK10	140	120	160

For metode og dokumentasjonskrav henvises det til NS-3031. I tillegg til de to ulike metodene er det satt minimumskrav til U-verdi og lekkasjetall som må oppfylles (se tabell 2-14).

Tabell 2-14 Krav til U-verdier TEK10

U-verdi[W/(m ² K)]				[Luftveksling pr. time]
Yttervegg	Tak	Gulv på grunn og mot det fri	Vindu/ dør ink. Karm/ramme	Lekkasjetall ved 50 Pa trykkforskjell
≤ 0.22	≤ 0.18	≤ 0.18	≤ 1.6	≤ 1.5

NS-3031

NS-3031 er offisielt tilbaketrasket og erstattet av SN-NSPEK 3031 av Standard Norge. TEK17 henviser dog fortsatt til NS-3031, og den er derfor fortsatt gjeldende.

2.3.4 SIMIEN

Simien er et norskskapt simuleringsverktøy brukt til energiberegninger, energimerking, evaluering mot forskriftskrav, vurdering av inneklime i bygninger og til dimensjonering av ventilasjon, kjøling og romoppvarming. Første versjon ble lansert i 2008, og i dag er siste versjon Simien 6. Simien 6 benytter dynamisk beregningsmetode som beskrevet i NS3031:2014.

2.4 Treverk

Tre som materiale har egenskaper som påvirker inneklimate, og som muligens kan påvirke energibruken i bygninger. For å forklare sammenhengen mellom tre og inneklimate, samt tre og energi er det i dette kapitlet først forklart litt om tre som materiale, deretter et delkapittel for de to nevnte sammenhengene.

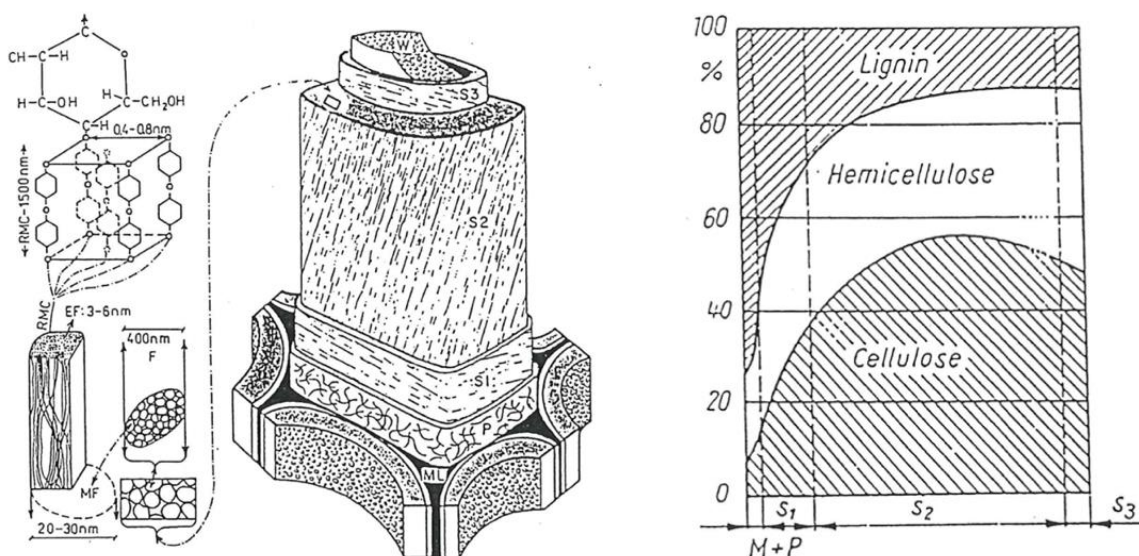
2.4.1 Tre som materiale

Egenskapene til tre som materiale kan forklares gjennom kjemisk og anatomisk oppbygning. Følgende kapittel er derfor dedikert til å forklare treetts struktur og kjemiske sammensetning. Neste kapittel omhandler konstruksjonsmaterialet massivtre.

Treetts vedanatomi

Slik som mennesker transporterer oksygen og næring gjennom blodårene har trær et lignende nettverk for transport. Om man undersøker et tverrsnitt av stammen i mikroskopet, vil stammen ligne en matrise bestående av mange små hull. Hullene er celler, som transporterer næring og vann ut til de ulike delene av treet. I celleveggen er det åpninger (porer) for transport mellom celler. I treet vil det også foregå en horisontal transport gjennom margstråler.

Celleveggen deles inn i ulike lag, kalt primærvegg, sekundærvegg og midtlamell (se figur 2-4). Sekundærveggen er tykkest, og har størst betydning for de fysiske egenskapene til treverket. Sekundærveggen består av tre lag, S1, S2 og S3, hvor mikrofibrillene er orientert i ulike retninger. Begrepet mikrofibrill betegner en bunt med cellulosestråder. De har krystallinske områder, kalt miceller, og mer uordnede områder kalt amorfe. Grunnet færre bindinger i de amorfe områdene kan det her bindes vann, i motsetning til i micellene som er krystallinske og inneholder færre frie OH-grupper som vann kan vinde seg til.



Figur 2-5 Illustrasjon av cellevegg og prosentvis sammensetning av celleveggen (Kucera, 1998)

Til høyre i figur 2-4 er det vist en oversikt over den kjemiske sammensetningen til celleveggen, inndelt etter lag. De tre hovedkomponentene er cellulose, hemicellulose og ligning. Funksjonen til de ulike stoffene kan beskrives gjennom en sammenligning med betong, hvor cellulose representerer armeringen som gir styrke, og ligninet er som sementen som binder det hele sammen. Hemicellulose har høyest absorptiv kapasitet av de tre stoffene, men har en mer uviss funksjon.

Trekonstruksjoner i Norge og bruken av massivtre

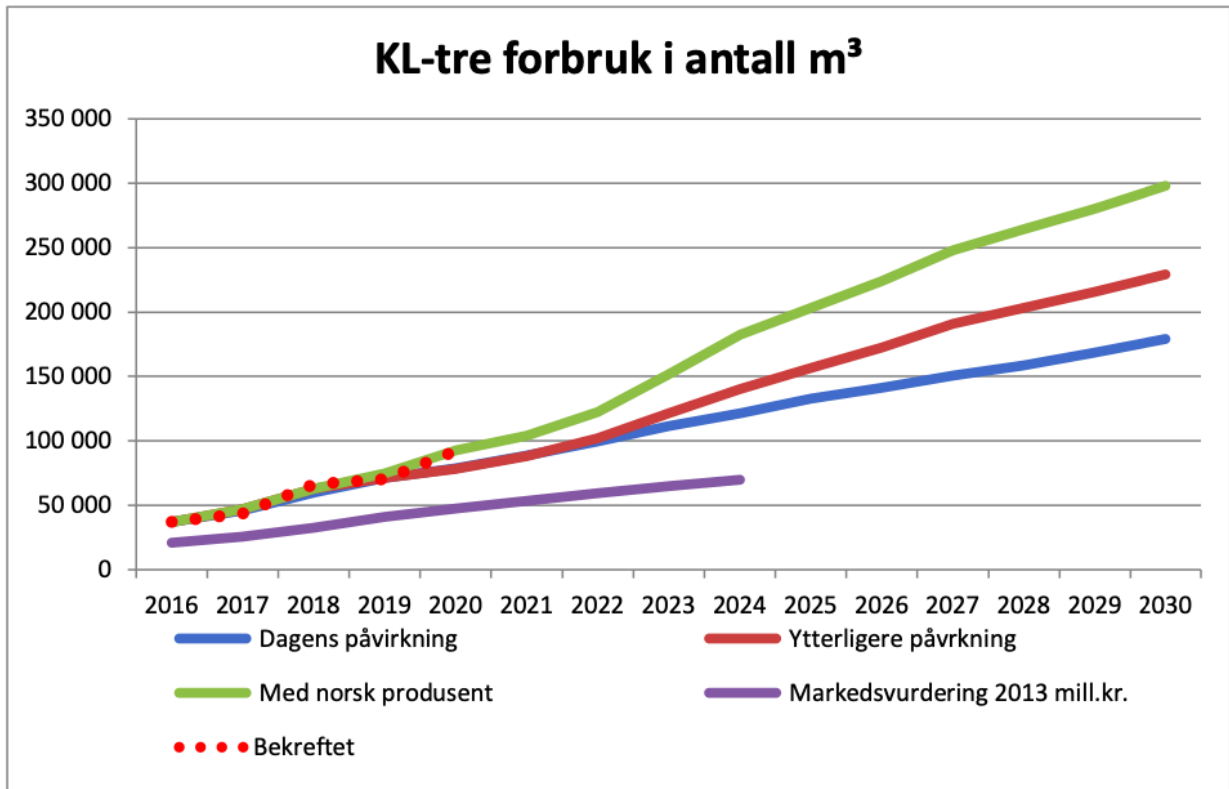
Ikke overraskende har Norge som et land med mye skog, lang erfaring når det kommer til trekonstruksjoner. Vi er verdenskjent for vikingskip, flotte stavkirker og gjennom bruken av laft. Ut på 1900-tallet kom limtre til Norden, og bruken av massivtre på slutten av 1990-tallet. Materialet har opprinnelse fra Østerrike og har vokst enormt i popularitet de siste 30 årene i Europa.

Massivtre, eller kryss-limt-tre (KL-tre) er som navnet tilsier et massivt materiale bestående av lag med bord (lameller) lagt på tvers over hverandre. Materialet som brukes er bartrær, i hovedsak gran, men også noe furu. I noen land eksperimenteres det også med bruk av andre treslag, som for eksempel eukalyptus (LesProm, 2021).

Selve produktet består av et oddetalls antall lag med lameller (3, 5, 7 eller 9) lagt med 90 graders vinkel oppå hverandre. Sammenføyningen er gjort ved hjelp av lim, skruer eller bolter. Materialet har på denne måten høy dimensjonsstabilitet da de krysslagte sjiktene motvirker treverkets krymping/svelling ved endringer i fuktighet. Med krysslimte sjikt oppnår man høy stivhet sammenlignet med vekt, noe som resulterer i et svært anvendbart bæremateriale med lave transport kostnader og kort byggetid.

Med forutsetning om bærekraftig skogdrift, er massivtre et miljøvennlig valg. Hele stammen benyttes under produksjonen. Det som ikke blir konstruksjonsvirke ender opp som bord til kledning, treflis til bruk som papir, trebaserte plater og isolasjon, eller til å produsere energi. I tillegg til sine konstruktive kvaliteter er materialet fornybart og binder CO². Med sin høye stivhet og styrke, kan massivtre benyttes istedenfor for stål og betong i bygningsprosjekter, og på denne måten spare miljøet for utslipp.

TreBruk AS har i de siste årene laget analyser av markedet for massivtre i Norge. I markedsanalysen for 2020 til 2030 (TreBruk AS, 2020) anslår de at forbruk i antall m³ vil tredobles (se figur 2-5). Lilla graf viser anslått prognose tilbake i 2013, mens rødstiplet linje viser den faktiske utviklingen. I rapporten viser de til stor vekst spesielt innenfor skoler. I rapporten skriver de at av alle skoler som ble bygget i 2016 var bare 8 % av bygningene i KL-tre. I 2019 er andelen fordoblet, og ligger på 20%.



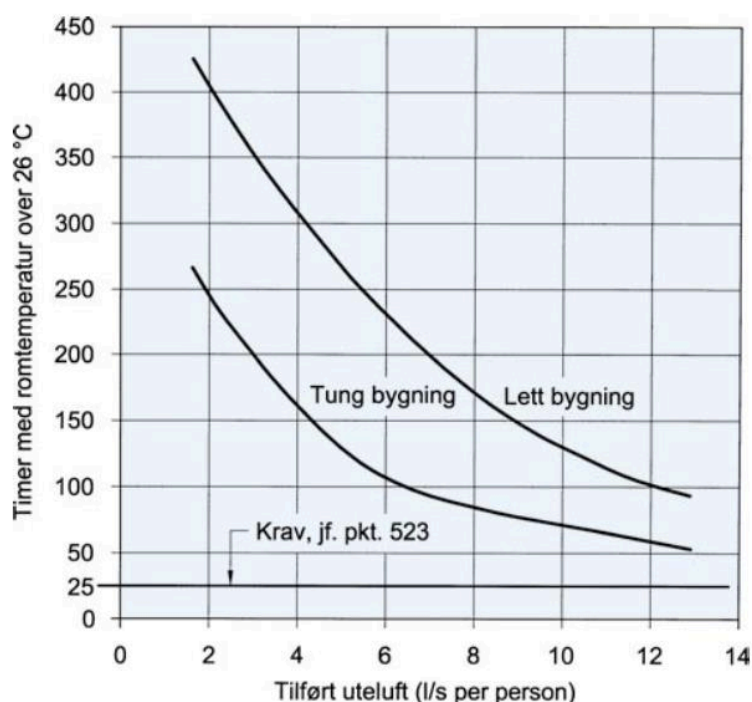
Figur 2-6 Markedsanalyse KL-tre fra 2020 til 2030 (AS, 2020)

2.4.2 Tre og inneklima

Egenskaper til treverk kan påvirke den termiske komforten i bygninger både positivt og negativt. Treverks lette egenvekt kan være fordelaktig i noen sammenhenger, men negativt i andre. I neste delkapittel om termisk masse forklares dette nøyere. Mulig energisparing gjennom fuktbufring blir også forklart videre i dette kapittelet, i tillegg til hvordan treverk, slik som mange andre materialer også emitterer VOC (flyktige organiske forbindelser), og på den måten kan påvirke kvaliteten til innelufta.

Termisk masse

Massen til bygningen vil påvirke bygningens termiske komfort og energibruk. I figur 2-7, hentet fra Byggforsk (Sintef Byggforsk, 2005b) er sammenhengen mellom bygningers termiske masse og andel av brukstid med høy inneetemperatur om sommeren. Bygninger i treverk anses vanligvis som del av kategorien for «lette» bygninger.



Figur 2-7 Bygningers termisk masse og betydning for andel av brukstid med høy inneetemperatur

Fuktbufring

Som beskrevet i kapittel 2.3.1 er ikke treverk et kompakt materiale, men er fullt av små rør. Gjennom porer i celleveggene dannes kontinuerlige transportårer, hvor treet tidligere kunne transportere vann og næring. Denne porestrukturen, og det at vann kan binde seg til de kjemiske hovedkomponentene er årsaken til at treverk anses som et hygroskopisk materiale, altså et materiale som kan oppta vanndamp fra omgivelsene. Trevirkets fuktighet vil innstille

seg i likevekt med omgivelsene, i en hastighet avhengig av blant annet porestruktur.

Mange materialer er i realiteten hygroskopiske, men i varierende grad ut ifra porestrukturen. I et klasserom av massivtre vil man ha mye potensiale for fuktbufring ettersom man har stort areal med overflater, og stor fuktproduksjon fra den store personbelastningen. Ventilasjon vil påvirke dette potensialet.

Hvordan vanndamp opptas i treverket kan forklares gjennom sorpsjon. Sorpsjon uttrykker en utveksling, enten som et opptak (absorpsjon) av vanndamp fra luften eller som en frigjøring (desorpsjon) av vanndamp til luften.

Diffusjonsåpen vs. diffusjonstett maling

For muligheten til fuktbufring må eventuell overflatebehandling være diffusjonsåpen. For å beskrive tettheten til et materiale brukes diffusjonsekvivalent luftlagtykkelse (s_d -verdi). Diffusjonsekvivalent luftlagtykkelse angir tykkelsen et stillestående luftlag må ha for å være like diffusjonstett som produktet det gjelder, målt i meter (Thue, 2002). En gradering av damp tettheten til byggematerialer er gjengitt i tabell 2-15 fra boka Fukt i Bygninger (Thue, 2002).

Tabell 2-15 Gradering av diffusjonstettheten til materialer (Thue, 2002)

Diffusjonstetthet	S_d [m]
Svært diffusjonsåpent	< 0.07
Diffusjonsåpent	0.07 – 0.7
Diffusjonstett	0.7 - 7.0
Svært diffusjonstett	> 7.0

VOC - emisjoner fra treverk og massivtre

Begrepet flyktige organiske forbindelser (VOC) er vanligvis knyttet til emisjoner som påvirker inn klimaet negativt. Typiske materialer som er forbundet med høy avgassing er overflatebehandlinger, lim og fugemasser. Avgassing vil avta med alder, men øke med stigende luftfuktighet og temperatur (Sintef Byggforsk, 2006).

Treverk er et biologisk materiale, og som også emitterer VOC. Det er også derfor treverk har en slik karakteristisk lukt. Hvor mye som emitteres avhenger av treslag, og er i stor grad forbundet med terpenener, som er hovedbestanddelen i harpiks. Furu inneholder 6% harpiks, og vil derfor emittere mer enn Gran, som inneholder 1-2% harpiks. Hvor skadelig dette er for mennesker er under diskusjon. I en studie (Knut R. Skulberg, 2019) er det undersøkt om det er forskjell i helseeffekt mellom de to treslagene. Hypotesen var at siden furu emitterer mer VOC enn Gran, så ville en forskjell i målt helse finne sted. Den helsemessige påvirkningen var ubetydelig, og styrket hypotesen om at VOC fra treslag er under skadelig nivå. Det er dog slik at massivtreprodukter ofte er sammenføydd med lim, og emisjoner fra dette må ses på i tillegg.

I bransjen er det i de siste årene jobbet med å få frem informasjon om miljøegenskapene til konstruksjonsmaterialer på en oversiktlig måte. Databasen ECOproduct, skapt i samarbeid mellom Grønn Byggallianse og Byggtjeneste oppfyller dette behovet. Her gis produktene karakterer innenfor 6 ulike kategorier; Helse og miljø, Inneklima, Drivhuseffekt, Energi, Råvarer og Sirkulærøkonomi. Karakterene spenner fra 1: Utmerket, til 8: Svært dårlig (eller ufullstendig). Kategorien inneklima viser til hvor mye helse- og miljøfarlige gasser en byggvare emitterer til innemiljøet. Det er på nettsiden til ECOproduct skrevet at emisjoner fra ubehandlet trevirke vurderes som «lavemitterende», tilsvarende M1-nivå. Men at for produkter sammenføyd med lim må emisjoner fra limet, eller produktet som sådan, dokumenteres. Helse- og miljø kategorien viser til forekomst av kjemikalier i forhold til den norske prioritetslisten eller fra listene til kjemikalierereguleringen (REACH).

I materialveilederen til Grønn Byggallianse (Byggalliansen, 2020) gis det en generell vurdering av konstruksjonsmaterialer, der iblant massivtre. Det Produktvurderingen til massivtreet som er benyttet på Hanstad, fra leverandøren Binderholz har fått karakter 2 (god) i kategorien inneklima, og karakter 1 (Utmerket) i kategorien for Helse- og miljø(Grønn Byggallianse).

2.4.3 Tre og energi

Om treverk kan bidra til energisparing har vært mye diskutert det siste tiåret. Til motsetning fra balansert mekanisk ventilasjon, er det antydnet at man gjennom bruken av naturlig ventilasjon i kombinasjon med effekten fra fuktbufring i tre kan oppnå besparelser i energi. Hvordan treverk kan bidra til varmeproduksjon gjennom fuktbufring og hygrotermisk effekt er gjennomgått i dette kapittelet.

Faseforandring og latent varme

Fra termofysikken vet vi at når is smelter gjennom opptak av varme, så øker ikke temperaturen til isen, men den endrer fase fra fast til flytende form. Andre eksempel på en slik faseforandring er fordamping (fra væske til damp). For at faseforandringen skal finne sted må vi altså tilføre energi, eller ved faseforandring i motsatt vei hvor det vil frigjøres energi. Molekylene i en væske er nærme og utøver attraksjonskrefter på hverandre, mens molekylene i en gass vil ha større avstand. Det er denne attraksjonskraften som trenger tilførsel av energi for å overvinnes, og som forklarer hvorfor vi må tilføre energi for at absorbert væske i treverk skal fordampe. Når treverk absorberer vann gjennom fuktigluft skjer en motsatt faseforandring fra damp til vann, som vil frigjøre energi. Denne faseforandringen sammen med bindingsenergien mellom vannet og trevirket er årsaken til at temperaturen til treoverflaten stiger ved opptak av fukt.

Hygrotermisk effekt

Når man anslår U-verdi for en konstruksjonsdel, antas stasjonære temperaturforhold. I realiteten vil U-verdien til et materiale være mye mer dynamisk, og vil svinge med endringer i vær og vind. For hygroskopiske materialer vil det ved fuktopptak dannes varme i materialet, som treverket avgir som stråling. Dette tas det ikke hensyn til i statiske beregninger. Treteknisk har i de siste årene forsket på denne effekten (Treteknisk), og om denne effekten gjør det mulig å redusere isolasjonstykkelsen i massivtrekonstruksjoner.

3 Metode

I denne oppgaven er det brukt kvantitativ metode. Data har blitt samlet inn fra utplasserte sensorer i en case-bygning over et lengre tidsrom. Bearbeiding av dataene er utført i Excel og JMP, og videre blitt brukt til simuleringer i SimScale og SIMIEN. All nødvendig simuleringinput er presentert i dette kapittelet.

3.1 Case-beskrivelse, Hanstad skole

Som nevnt i innledningen er formålet med den eksperimentelle konstruksjonen på Hanstad å forske på inn klima og energi til trekonstruksjoner, samt å utfordre TEK med tanke på krav til energi. Konstruksjonen fikk dispensasjon for minstekrav til U-verdier og for krav til energiramme. Effekten av massivtreets hygrottermiske masse kan som beskrevet i kapittel 2.3.3 føre til redusert energiforbruk, og var muligens argument for å droppe isolasjon. En ytterveggkonstruksjon kun bestående av luftet kledning og 340 mm massivtre er uvanlig, og oppnår ikke kravene i henhold til TEK.

I tillegg til den eksperimentelle ytterveggkonstruksjonen har skolen en noe uvanlig ventilasjonsstrategi, bestående i en kombinasjon av vinduslufting og et desentralisert ventilasjonssystem. Dette anlegget blir beskrevet nærmere i kapittel 3.1.4.

Inneklima er også et fokuspunkt i utformingen av denne konstruksjonen. I de ulike klasserommene er det derfor benyttet ulike overflatebehandlinger for å undersøke hvilken effekt dette har på inn klimaet.

På figur 3-1 finner vi en situasjonsplan av Hanstad skole, hvor massivtrebygningen, som er fokuset i denne oppgaven, er fremhevet i rødt og de andre skolebygningene i blått. Bruttoarealet på massivtrebygningen er 597 m², hvorav 544 m² er oppvarmet.



Figur 3-1 Situasjonsplan Hanstad skole

3.1.1 Utforming og personbelastning

Romprogrammet til massivtrebygningen består av fire klasserom, fem grupperom og diverse støtterom som toalett, gang osv. I hver etasje er det to klasserom, et mot nord-vest og et mot sør-øst. Plantegning er vist på figur 3-2.

Klasserommene har et areal på ca. 70 m², og har en romhøyde på 3 m. Veiledende arealnorm for klasserom angir 2 m² som minsteareal pr elev og 6 m² for hver ansatt (Sintef Byggforsk, 2005b). Med bakgrunn i dette kan maksimalt antall elever i rommet settes til 32 stk. Reelt antall elever ligger under kravet for alle klasserommene. Oversikt over antall brukere medregnet lærer er vist i tabell 3-1. Romhøyde på 3 m er også tilfredsstillende, ettersom anbefaling til romhøyde (Arbeidstilsynet) for romareal over 40 m² ligger på 2.7 m. Brukstid for klasserommene er fra klokken 08 til 14 på hverdager.



Figur 3-2 Plantegning massivtrebygning, Hanstad skole

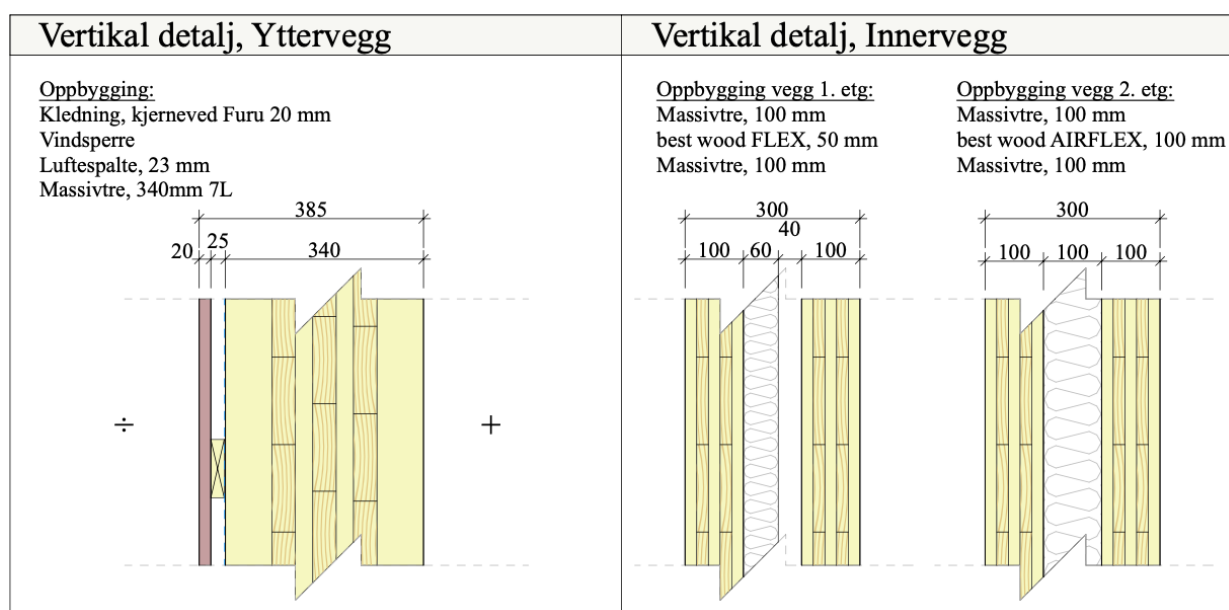
Tabell 3-1 Oversikt over bruk og personbelastning i Nybygg våren 2021

Klasserom	Årstrinn	Antall brukere
1 Nord	6. klasse	23
1 Sør	6. klasse	24
2 Nord	7. klasse	26
2 Sør	7. klasse	26

3.1.2 Konstruksjon

Veggkonstruksjon

Veggdetaljer er vist i figur 3-3 og overslag av U-verdi i tabell 3-2. Bærekonstruksjonen til bygget består av massivtre i gran fra leverandøren Binderholz. Ytterveggene er totalt 383 mm tykk, med 340 mm massivtre, vindsperre og luftet kledning av furu ytterst. Veggelementene er falset, og montert med plugg i hvert tverrlag. I bunn av elementene er det lagt inn boks med skjulte føringer for elektrisitet. Innervegger består av et sandwichelement med dobbel 100mm massivtre, hvor et 100mm hulrom med isolasjon/luft i midten vil bidra til lydisoleringen i bygget.



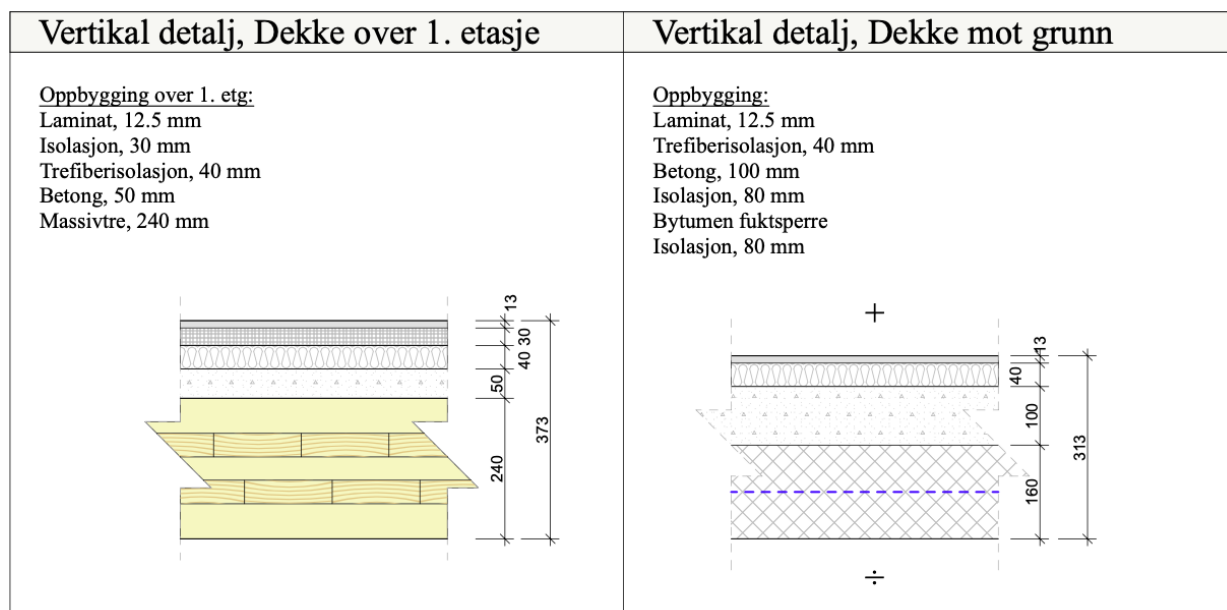
Figur 3-3 Detaljer over veggkonstruksjoner

Tabell 3-2 Anslått U-verdi yttervegg

U-verdi Yttervegg			
Veiledende verdier for R og λ hentet fra Trehusboka side 391 og 392 (Sintef Byggforsk, 2017e)			
Komponenter	Dimensjon[m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Innvendig varmeovergangsmotstand (R _{si})			0.13
Massivtre (densitet 500 kg/m ³)	0.34	0.13	2.62
Vindsperre			0.03
Ventilert kledning			0.13
Total varmemotstand (R) =			2.91
U-verdi = 1/R =			0.34

Gulv mot grunn og løsning for etasjeskiller

Gulvdetaljer er vist i figur 3-4 og overslag av U-verdi i tabell 3-3. Gulv mot grunn består av 40 mm trefiberisolasjon over betong, og linoleumsbelegg på toppen. Etasjeskiller er 373 mm tykk.



Figur 3-4 Detalj over gulv mot grunn og etasjeskiller over 1. etasje

Tabell 3-3 Anslått U-verdi etasjeskiller over 1. etasje

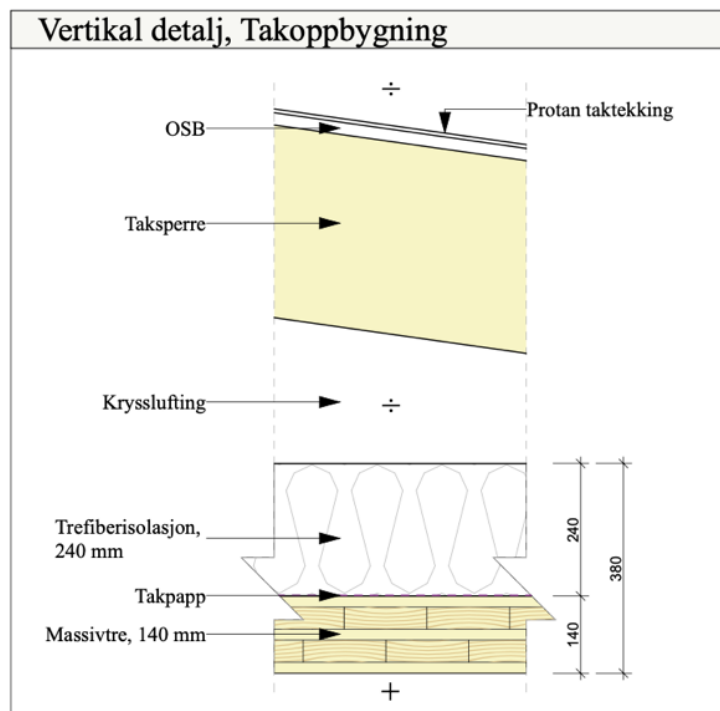
U-verdi etasjeskiller over 1. etasje			
Veiledende verdier for R og λ hentet fra Trehusboka side 391 og 392 (Sintef Byggforsk, 2017e)			
Komponenter	Dimensjon[m]	λ [W/mK]	R[m ² K/W]
Innvendig varmeovergangsmotstand			0.1
Laminat			0.03
Isolasjon (antatt Hunton Nativo)	0.09	0.038	2.39
Betong (antatt λ -verdi)	0.05	1.35	0.04
Massivtre	0.24	0.13	1.85
Innvendig varmeovergangsmotstand			0.1
Total varmemotstand (R)			4.51
U-verdi = 1/R =			0.22

Tabell 3-4 Anslått U-verdi Etasjeskiller over 2. etasje

U-verdi Etasjeskiller over 2. etasje			
Veiledende verdier for R og λ hentet fra Trehusboka side 391 og 392 (Sintef Byggforsk, 2017e)			
Komponenter	Dimensjon[m]	λ [W/mK]	R[m ² K/W]
Utvendig varmeovergangsmotstand			0.04
Trefiberisolasjon (antatt Hunton Nativo)	0.24	0.038	6.3
Takpapp			0.03
Massivtre (densitet 500 kg/m ³)	0.14	0.13	1.08
Innvendig varmeovergangsmotstand			0.1
Total varmemotstand (R) =			7.55
U-verdi = 1/R =			0.13

Massivtredekke over 2. etasje og takkonstruksjon

Detalj for takoppbygning er vist i figur 3-5, og konstruksjonens U-verdi i tabell 3-4.



Figur 3-5 Detalj Etasjeskiller over 2. etasje og takkonstruksjon

Vinduer

Vinduene i bygget er fra leverandøren Schüco, og er 2/3 lags isolerruter med eller uten energiglass. Vinduene mot sør har integrert solskjerming. Vinduenes dimensjon er 1220 x 2445 mm. I hvert klasserom er det en utadslående dør i glass, i tillegg til fem store vinduer. Tre av vinduene er åpnbare (vippehengslet), mens hjørnevinduene er fastmontert. U-verdi glass og g-faktor er hentet fra produktblad, og for U-verdi til karm er en standardverdi fra SIMIEN antatt. De ulike vindusegensapene er oppført i tabell 3-5.

Lufteregime for klasserommene består hovedsakelig i vinduslufting i friminuttene. Driftspersonale har opplyst om at det luftes gjennom verandadør store deler av dagen på sommerstid.

Tabell 3-5 Egenskaper vinduer

U-verdi		G-faktor, vinduer med integrert solskjerming		G-faktor, ikke integrert Standardverdi SIMIEN, 3 lag glass, hvor to er energispareglass
		Aktivert	Deaktivert	
Glass	0.6	0.1	0.3	0.45
Total ink. Aluminiumskarm	1.13			

3.1.3 Overflatebehandling

Etter ferdigstillelse i 2017 ble tre av fire klasserom overflatebehandlet med en silikatmaling (GMBH). Alle veggene ble slipt i 2020 for å kunne utføre forskning på eksponerte treverks hygroskopiske effekt på inn klimaet (Skulberg, 2022). Eventuelle rester av den gamle silikatmalingen vil ha lite å si da denne i henhold til tabellverdier (Thue, 2002) er diffusjonsåpen (s_d -verdi < 0.7). Silikatmaling har en s_d -verdi på 0.049. Veggene i to av klasserommene ble lakkert med en diffusjonstett klarlakk (Williams, 2017) mens de resterende to forble nedslip/ubehandlet. Oversikt over behandlingen er vist i figur 3-6.



Figur 3-6 Oversikt, eksponerte treoverflater vs. overflatebehandling

3.1.4 Beskrivelse av oppvarming og ventilasjonssystem

Oppvarming

Den eksisterende skolebygningen fra 1982 har et høytemperaturanlegg og benytter to eldre EL-kjeler til oppvarming. Massivtrebygningen er koblet på nærvarmesystemet. Den drives altså på et lavtemperaturanlegg, med 60 grader turtemperatur og 40 grader returtemperatur. Hvert klasserom har to radiatorer hver (se figur 3-2 for plassering). Termostaten er digital og styres av driftsteknikerne. De er normalt stilt inn på 20 grader, foruten om på vinterstid hvor de settes til 22 grader.

Ventilasjon

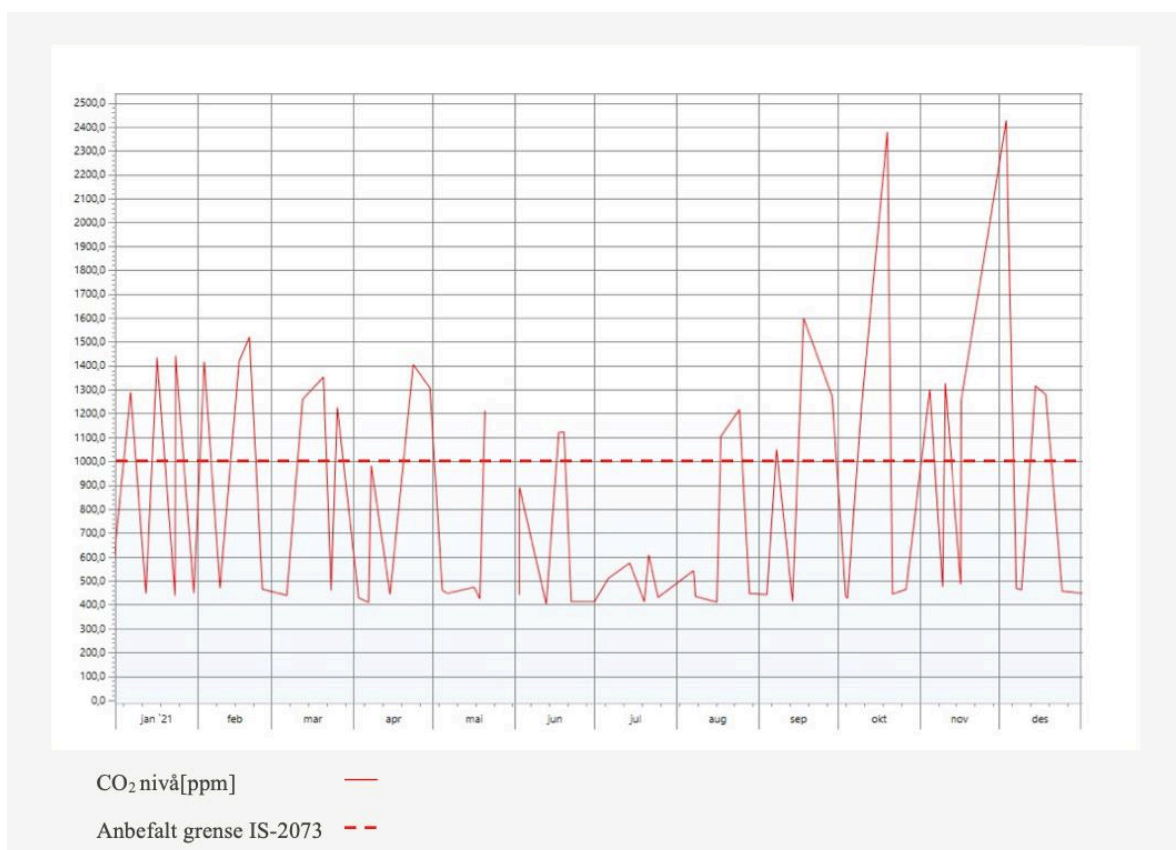
Ventilasjonsstrategien på Hanstad består av et desentralt anlegg som suppleres med naturlig ventilasjon gjennom vinduslufting. Klasserommene er utstyrt med hver sin enhet, som inneholder både utkast og avtrekk, og som er styrt med konstant luftmengde. Enhetene er plassert i fasadevegg mot sør-vest, som vist på figur 3-2. Modell og sentrale egenskaper er oppgitt i tabell 3-6. Ventilasjonseenhet på klasserommene er oppført med to ulike verdier for temperaturvirkningsgrad ettersom det er oppgitt to ulike verdier i produktbladene. Det er antatt at det her skiller mellom en teoretisk og en praktisk verdi. Grupperom og garderobe har CO₂-styrt ventilasjon, bestående av to mindre enheter som skifter på å være avtrekk og utkast.

Etter et par år i bruk og flere klager om dårlig komfort på vinterstid ble et ekstra varmeelement montert i ventilasjonseenhetene på klasserommene. Opprinnelig hadde anleggene en varmekolbe på 1500 W, som ble forsterket med ytterligere 1000 W, hvilket er maksimal for dette anlegget.

Klasseromsenhetene styres gjennom bruk av trinn, hvor trinn 3 på 600 m³/h er i bruk fra 07:00 til 15:00 på hverdagene. Utenfor skoletid er anlegget avslått, utenom på de varmeste sommerdagene hvor anlegget brukes til frikjøling om natten. CO₂ målinger og beregning ut ifra person og materialbelastning tilsier at trinn 3 har for liten luftmengde, men ettersom denne er i grenseland med tanke på støy så kan det ikke benyttes høyere styringstrinn. For å visualisere forholdene for luftkvaliteten i klasserommene er CO₂-trend for rom 2S gjennom 2021 vist i figur 3-7, og beregnet luftmengdebehov vist i tabell 3-7. En anslått misnøye grunnet lav luftmengde er anslått gjennom figur 2-4, hvor en luftmengde på 6.7 l/s vil føre til en PPD på 20%.

Tabell 3-6 Oversikt ventilasjon Hanstad, kilde egenskaper: (Tecalor), (Tecalor), (Tecalor)

Rom	Type	Produktnavn	Luftmengde[m ³ /h]	Temperaturvirkningsgrad	
Klasserom	CAV	LTM Dezent 800	600	0.92	0.8
Grupperom	VAV	TL 200-50	100	0.88	
Garderobe	VAV	TL 1230	115	0.89	



Figur 3-7 Målt CO₂ trend gjennom sensor i ventilasjonsaggregat for rom 2S i 2021

Tabell 3-7 Luftmengde Hanstad sammenlignet med Krav TEK10

	Belastnings- type	Krav TEK10	Behov for luftmengde i klasserom ut ifra TEK10	Reel luftmengde i klasserom
I brukstid	Person	26 m ³ /h pr person	26 m ³ /h x 26 pers = 676 m ³ /h	
	Material	2.5 m ³ /h pr m ² gulvareal	2.5 m ³ /h x 70 m ² = 175 m ³ /h	
SUM			851 m³/h	600 m³/h
Utenfor brukstid	Person	0 m ³ /h	0	
	Material	0.7 m ³ /h pr m ² gulvareal	0.7 m ³ /h x 70 m ² = 49 m ³ /h	
SUM			49 m³/h	0 m³/h

Beregning av lufthastighet:

$$V = 600 \text{ m}^3/\text{h} = 0.167 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \text{tverrsnitt uttaksluft (rektangulær)}, A = 1200 \times 150 \text{ mm} = 0.18 \text{ m}^2$$

$$c = c = \text{Volumstrøm} / A = 0.167 / 0.18 = 0.93 \text{ m/s}$$

Omgjøring av luftmengde fra m³/h til l/s per. person:

$$(600 \text{ m}^3/\text{h} \times 3600^{-1} \text{ sekund} \times 1000 \text{ liter}) / 25 \text{ personer} = \underline{6.7 \text{ l/s}}$$

3.1.5 Energibruk

Fra driftspersonalet på Hanstad er det bistått med underlag på reell energibruk. Reell energibruk er vist i tabell 3-8, sammen med estimert energibruk fra prosjekteringsfasen. Estimert beregning er gjort med bakgrunn i et oppvarmet BRA på 544 m².

Post for EL-spesifikt forbruk innebærer elektrisitet til lys, tekniske systemer og vifter til ventilasjonsenhetene, mens oppvarming bare viser til radiatorvarme. Data for reelt forbruk fra EL er basert på målinger fra halve 2018 og halve 2019. Tall på prosjektert forbruk er hentet fra en rapport utarbeidet av Multiconsult (Multiconsult, 2019), og oppnår akkurat kravene som var gjeldende på den tiden (120 kWh/m² år). Reell energibruk er 6 % høyere enn prosjektert.

Tabell 3-8 Estimert energibruk opp mot forbruk

	Estimert forbruk [kWh/m ² år]	Reelt forbruk [kWh/m ² år]	Differanse [%]
Oppvarming	71.2	55.4	- 22
Kjøling	0	0	0
El-spesifikt energibruk	47.2	70.0	+ 48
TOTAL energibruk	118.4	125.4	+ 6

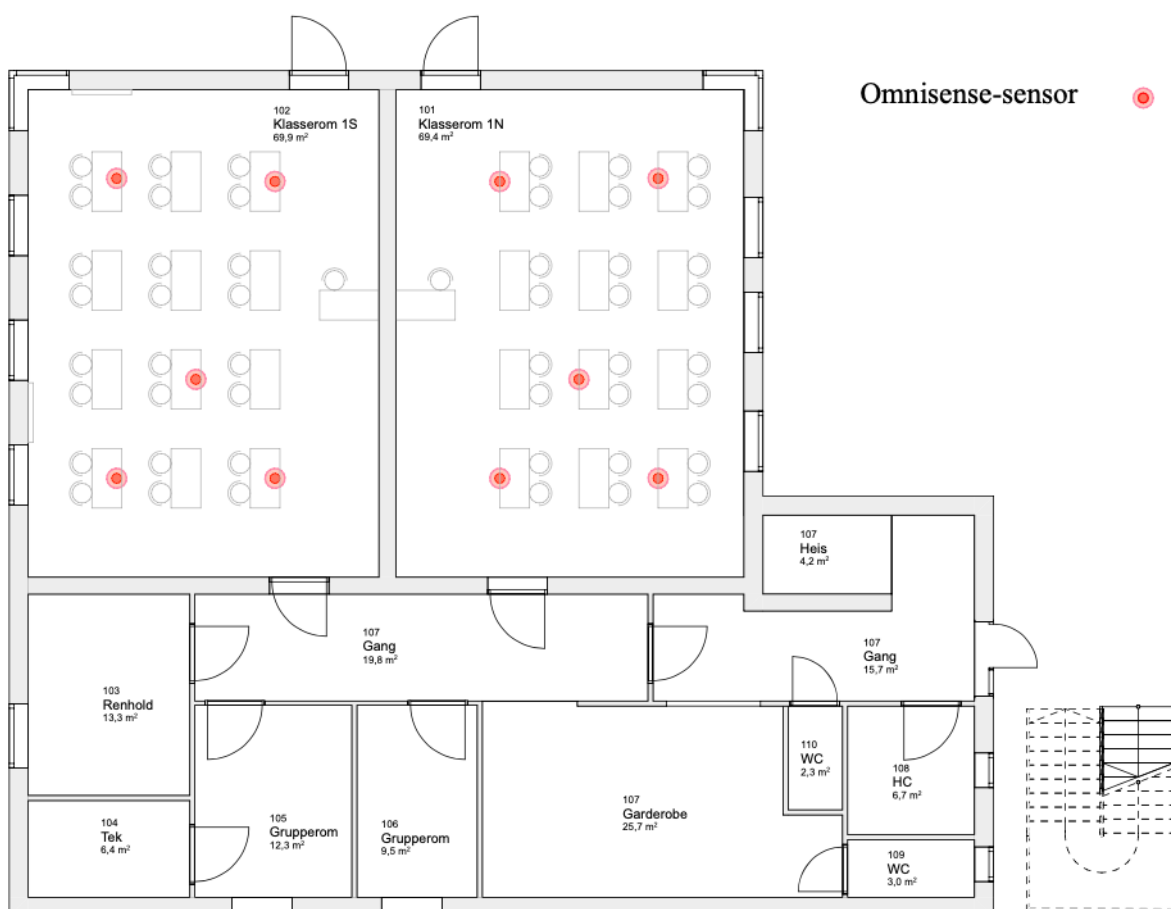
3.2 Klimadata

Alle kilder til klimadata, samt begrunnelse for utvalg er presentert i dette kapittelet.

3.2.1 Sensorer for måling av termisk inn klima

I begynnelsen av 2021 ble 20 sensorer plassert ut i massivtrebygningen, 5 stk. i hvert klasserom. I løpet av sommeren 2021 ble sensorene demontert. Sensorene er av typen Omnisense S-11 Wireless, og hadde som hensikt å dokumentere den termiske komforten gjennom målinger av RF og lufttemperatur. De utplasserte sensorene muliggjør sammenligning av komforten mellom rom, men også mellom sensorer innad i rommene. Etersom plantegning med eksakt plassering av de fem sensorene er utilgjengelig, er plantegning med markerte sensorer derfor bare veiledende, og vist i figur 3-8.

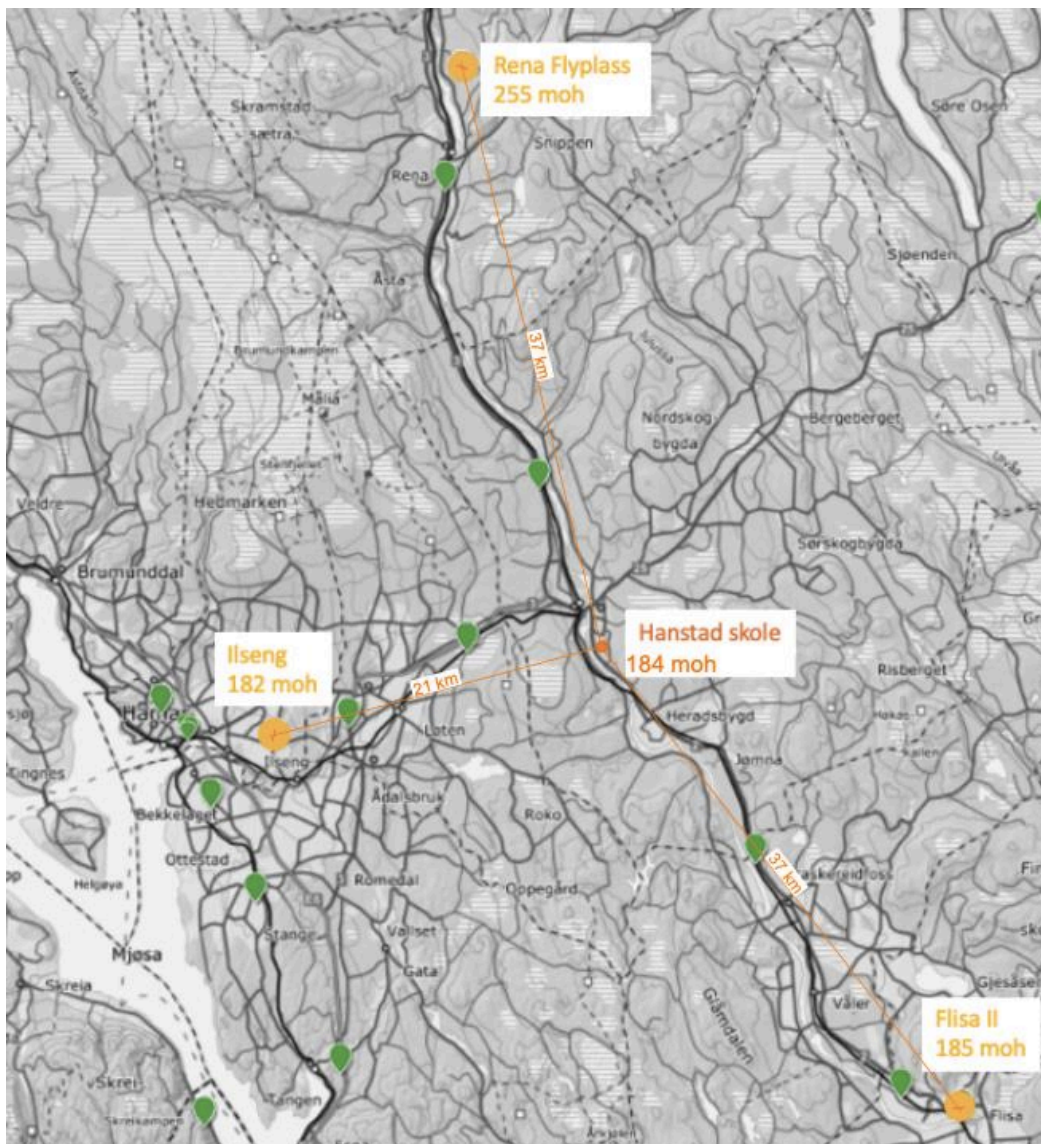
Sensorenes målinger av lufttemperatur vil delvis være påvirket av stråling, og kan derfor avvike noe fra reell lufttemperatur.



Figur 3-8 Planoversikt sensorer. Plasseringen er lik i begge etasjer.

3.2.2 Data for uteklima

Tre værstasjoner er undersøkt som kilde til utvendig klimadata; Ilseng II, Rena Flyplass og Flisa. Ilseng er nærmest, men Flisa og Rena er mer relevant terrengmessig. De ulike værstasjonenes plassering sammenlignet med Hanstad er vist i figur 3-9. Ettersom Flisas høydeplassering passer best overens med Hanstad, er denne værstasjonen valgt. Fra denne stasjonen er det hentet ut data for luftfuktighet, RF, normal døgnmiddeltemperatur og gjennomsnittlig skydekke over et døgn fra nettsiden til Norsk klimaservicesenter (Norsk Klimaservicesenter, 2021). Data for skydekke er brukt i sammenheng med beregninger av effekt fra solstråling til bruk i simuleringer. Normal døgnmiddeltemperatur er brukt til å lage statistikk over klimaforholdene ved Hanstad på vinterstid.



Figur 3-9 Oversikt over værstasjoner i nærheten av Elverum

3.2.3 Data for inneklima

Fra Omnisense-målinger er det utarbeidet et datasett med ca. 23 000 målinger for målt innvendig lufttemperatur, og like mange for målt innvendig RF for hele måleperioden. Hvert roms måling er basert på gjennomsnitt fra de fem sensorene innad i hvert rom, og er målt hvert 5. minutt.

Bearbeiding av datasett med sensormålinger

Datasett med sensormålinger er bearbeidet i Excel og JMP. Tidsrom utenfor bruk, som ferier, helger og ukedager utenfor tidsrommet ca. 08-14 er luket bort. Se tabell 3-9 for oversikt over fridager. For vurdering mot forskrift om miljørettet helsevern er bare målinger i vinter- og sommersesongen vurdert mot krav, mens for vurdering mot SN-CEN/TR 16798-2:2019 er også vårperioden tatt med.

En av sensorene ble feilgruppert i demonteringsfase og plassert sammen med sensorene for rom 2N. Feilplassert sensor ble lokalisert på grunnlag av tall for median, samt generell overenstemmelse med de andre sensorene i gruppen. Tidspunkt for montering og demontering var utilgjengelig, og ble definert gjennom visualisering av datasett for hele perioden.

Tabell 3-9 Ferier og fridager 2021 ved Hanstad skole

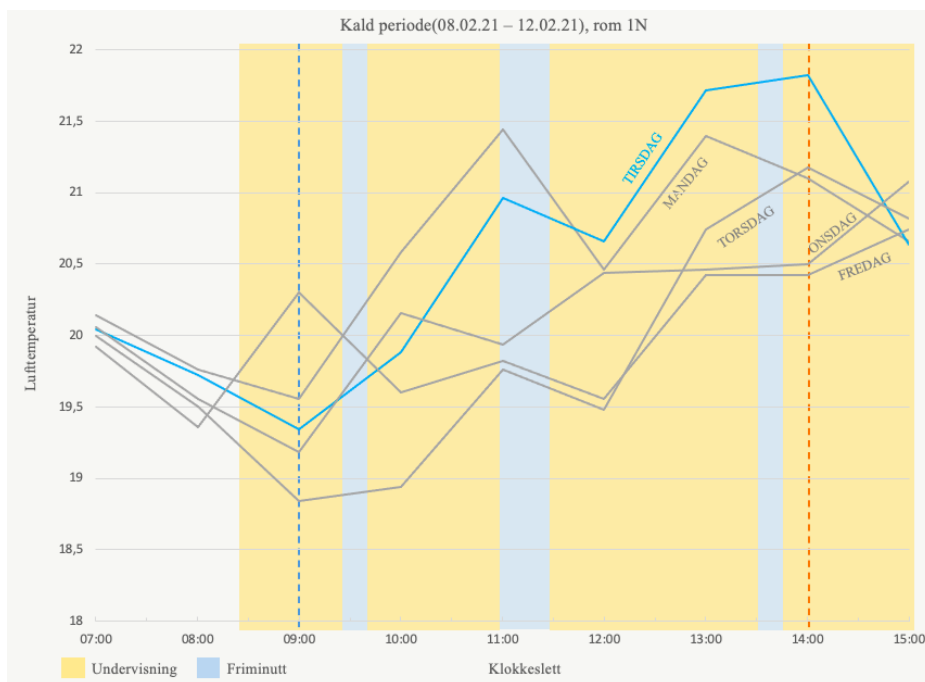
Ferie	Dato
Vinterferie	01.03.21 – 07.03.21
Påske	29.03.21 – 04.04.21
17. mai	17.05.21
Sommerferie	18.06.21 – 16.08.21
Høstferie	11.10.21 – 17.10.21
Juleferie	22.12.21 - 31.12.21

Selv om elevene er på skolen kan klasserommene fortsatt stå tomme, grunnet emner som krever spesielle rom, slik som kunst og håndverk, mat og helse eller gymnasikk. Antall elever tilstede i klasserommet vil også naturlignok variere. Dette kan skyldes at elevene fordeles til grupperom, eller at sykdom kan redusere antall elever. Det er ikke usansynlig at måledataene er påvirket av koronapandemien og karantenerregler. Resultatene kan altså ha en viss grad av usikkerhet, da aktiviteten i rommene påvirker målinger på temperatur og luftfuktighet, og dermed også målinger for termisk komfort. Et annet usikkerhetsmoment er grad av lufting gjennom vinduer, samt hvor ofte døren til gangområdet står åpen.

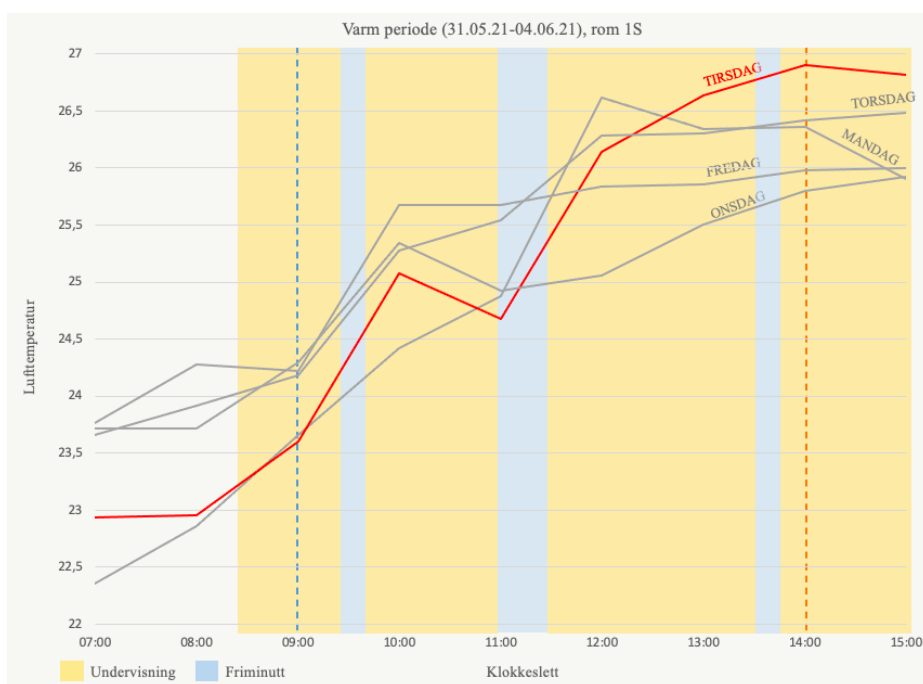
Uttak av data til bruk i simuleringer

For valg av kald/varm dag for simulering av termisk komfort er det laget plott av måledata for en spesielt kald og varm uke (se figur 3-10 og 3-11). Dagene som hadde størst økning i temperatur ble antatt å være mest aktuelle å simulere, da disse antyder bruk gjennom hele

dagen. Valgt dag er markert i blått for vinterperiode og rødt for sommerperioden. Ettersom målet med simuleringene er å vise de verste tilfellene med tanke på ubehag grunnet kulde eller varme, ble tidspunkt tidlig og sent i skoledagen valgt ut. Tidspunktene er markert med en stiplet linje. Ved å ta kaldeste og varmeste tidspunkt vil man også få et overblikk over hvordan den termiske komforten utvikler seg ut over dagen. I figurene er tidspunkt for undervisning markert i orange og pauser/friminutt markert i blått. Dette er gjort med tanke på å kartlegge aktuelle tidsrom for vinduslufting av rommene.



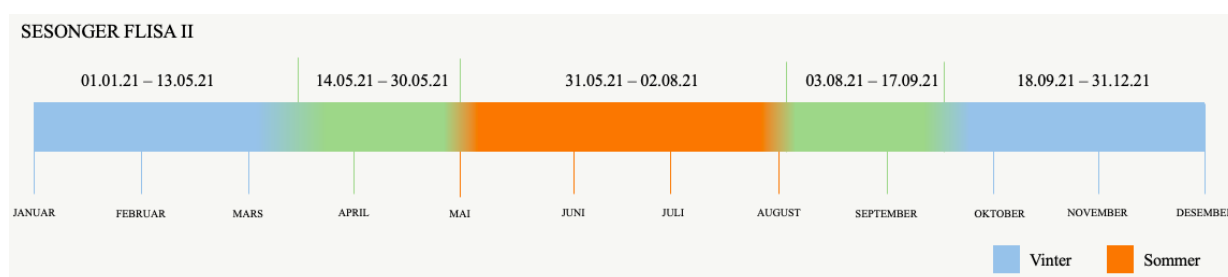
Figur 3-10 Visualisering av aktuelle simuleringsdager for vinteruke



Figur 3-11 Visualisering av aktuelle simuleringsdager for sommeruke

3.3 Dokumentasjon og klassifisering av termisk komfort i klasserom

I kapittel 2.1.4 ble det presentert to ulike muligheter for å klassifisere den termiske komforten i bygninger; 1) gjennom bruk av kravene til forskrift for miljørettet helsevern (IS-2073) eller 2) gjennom kvalitetsklasser definert i SN-CEN/TR 16798-2:2019. Begge metodene har grenseverdier knyttet til de ulike sesongene i løpet av året (dvs. sommer og vinter). Ettersom ulike deler av landet har ulik lengde på sesongene er det laget en klassifiseringsnøkkel som er spesifikk for Elverum-klima (se figur 3-12). Utvendig middeltemperatur (døgn) i 2021 er hentet ut for Flisa II værstasjon og brukt i ligning 2-5 for å beregne løpende gjennomsnittstemperatur. Antall dager innenfor hver sesong er vist i tabell 3-10.



Figur 3-12 Klassifiseringsnøkkel for Flisa II utregnet etter ligning 2-5

Tabell 3-10 Oversikt over antall dager og timer innenfor hver sesong innenfor måleperioden

Sesong	Antall bruksdager	Antall brukstimer
Vinter	64	384
Vår	11	66
Sommer	17	102
SUM	92	552

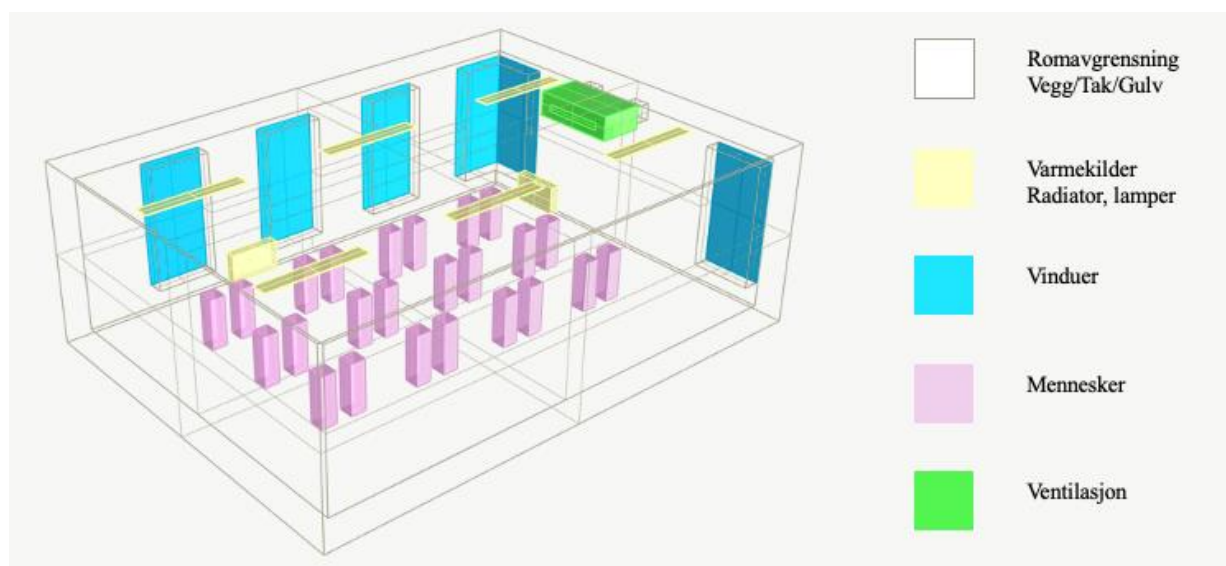
3.4 Simulering av luftstrøm

Simscale inngår i en kategori av simuleringprogrammer kalt computational fluid dynamics (CFD). Her simuleres fluid dynamikk/luftbevegelse og varmetransport basert på en numerisk tilnærming. Programmet har tysk opphav. Programmet er profesjonelt anerkjent, men likevel gratis og tilgjengelig for alle. I denne oppgaven vil programvaren brukes for å beregne PMV og PPD gjennom en «convective heat simulation». Ettersom elevene har klaget over høye temperaturer på sommeren og for lave temperaturer på vinteren blir det valgt ut to ulike simuleringdatoer, en med minusgrader utendørs, og en med sommertemperatur. Fra resultatene hentes det ut temperaturer fra 5 punkter som samsvarer med plasseringen til Omnisense-sensorene. Hvor godt verdiene samsvarer vil kunne gi en evt. validering av simuleringen, som kan gi informasjon om den termiske komforten til elevene.

3.3.1 CAD-import

For å simulere i Simscale må en bygningsmodell importeres inn i programmet. Flere ulike tegneprogrammer er mulig å benytte, men i denne studien er det benyttet Rhinoceros 3D. Ettersom at denne simuleringen er en del av studien på komfort i de to klasserommene er ikke hele bygget simulert, men bare et enkelt klasserom.

Målet med modellen er at den skal definere et volum hvor vi kan studere luftbevegelse. Dette volumet er den negative formen av modell vist i figur 3-13. Objektene må være av typen «solids» og være kombinert til en enkelt modell for å fungere. Alle flater som senere skal ha en funksjon i simuleringen må defineres, altså må vindusflater, lamper osv. ha reelle størrelser. Forenklinger i modell er gjort der hvor objektene har organisk form, for eksempel menneskene. Disse er modellert svært forenklet som kuber, men har tilsvarende overflateareal som et barn i skolealder. Alle møbler er utelatt fra modellen.



Figur 3-13 Simscale modell

3.4.1 Inndata

Stråling fra vinduer

Strålingsflux er beregnet gjennom anvisning fra SINTEF Byggforsk (SINTEF Byggforsk, 1992). Data er hentet ut for de ulike himmelretningene til fasadene ved en breddegrad på 60 grader nord. Inndata er gitt i tabell 3-11 for vintersimulering og 3-12 for sommersimulering. G-faktor er hentet fra tabell 1(SINTEF Byggforsk, 1992).

Tabell 3-11 Solstråling vinter

Simulering kald dag (09.02.21) i rom N1				
Dato, klokkeslett: 15 februar, Kl. 12				
Værtype: klart (målt 1 octas i gjennomsnitt for denne dagen ved Flisa II værstasjon)				
Fasade	Klokkeslett	Solvarme W/m ²	Varmeflux[W/m ²]	Sum [W/m ²]
NV	09	31	0.8 x 31	24.8
	14	43	0.8 x 43	34.4
SV	09	36	0.8 x 36	28.8
	14	156	0.8 x 156	124.8

Tabell 3-12 Solinnstråling sommer

Simulering varm dag (01.06.21) i rom S1				
Dato, klokkeslett: 15 juni, Kl. 12				
Værtype: delvis overskyet (4.3 octas i gjennomsnitt for denne dagen ved Flisa II værstasjon)				
Fasade	Klokkeslett	Solvarme W/m ²	Varmeflux[W/m ²]	Sum [W/m ²]
SØ	09	435	0.3 x 435	130.5
	14	440	0.3 x 440	132
SV	09	143	0.5 x 143	71.5
	14	165	0.5 x 165	82.5

Beregning av overflatetemperatur på innvendig glass:

Følgende beregning gjelder for 09.02.21 kl. 09:00 og er gjort ved bruk av formel 2-6. Samme beregning er gjort for beregning av innvendig overflatetemperatur på fasade.

$$\frac{\Delta\theta_{si}}{\Delta\theta_{tot}} = \frac{R_{si}}{R_{tot}}$$

$$\Delta\theta_{si} = \frac{R_{si}}{R_{tot}} \times \Delta\theta_{tot}$$

$$= \frac{0.13}{1.67} \times 33.6 = 2.6$$

$$\theta_{si} = 19.3 - 2.6 = 16.7$$

Beregning av varmestrøm gjennom vindu:

Følgende beregning gjelder for 09.02.21 kl. 09:00 og er gjort ved bruk av formel 2-7. Samme beregning er gjort for de andre klokkeslettene.

$$\begin{aligned}q &= \Delta t \times h \\ &= 33.64 \times 0.6 = 20.2 \\ &= 28.8 - 20.2 = 8.6\end{aligned}$$

Beregning av temperatur på innblåsingluft:

Følgende beregning gjelder for 09.02.21 kl. 09:00 og er gjort ved bruk av formel 2-9. Samme beregning er gjort for de andre klokkeslettene.

$$\begin{aligned}\eta_t &= \frac{L_t(t_2 - t_1)}{L_{min}(t_3 - t_1)} \\ t_2 &= \eta_t (t_3 - t_1) + t_1 \\ t_2 &= 0.92(19.3 + 14.3) - 14.3 = 16.7\end{aligned}$$

Tabell 3-13 Input vintersimulering Simscale

Inndata, rom 1N, 09.02.21, Vinterdag			
Parametere	Kl. 09:00	Kl. 14:00	Henvising
Utetemperatur	-14.3	-7.7	Flisa II værstasjon
Innetemperatur	19.3	21.8	Omnisense
Differanse temperatur	33.6	29.5	-
innendørs RF	15.1	15.8	Omnisense
Met	1.2		Se tabell 3-15
Clo	1		Se tabell 3-15
Varmetilskudd mennesker	70 W/m ² hudoverflate		-
Varmetilskudd lys	30 W pr lampe		Antatt verdi, LED lys
Varme fra radiatorer	640 W pr radiator		Anslått verdi
Temperaturvirkningsgrad	0.92		Se tabell 3-6
Temperatur innblåsingluft (t_2)	16.7	19.5	Se eksempelutregning
U-verdi glass	0.6		Se tabell 3-5
Overflatetemperatur vindu	16.7	19.5	Formel 3-2
U-verdi yttervegg	0.34		Se tabell 3-2
Overflatetemperatur innside yttervegg	15.5	18.5	Formel 3-2
Varmestrøm vindu. NV	4.62	16.7	Formel 2-7
Varmestrøm vindu. SV	8.6	197.1	Formel 2-7

Tabell 3-14 Input sommersimulering Simscale

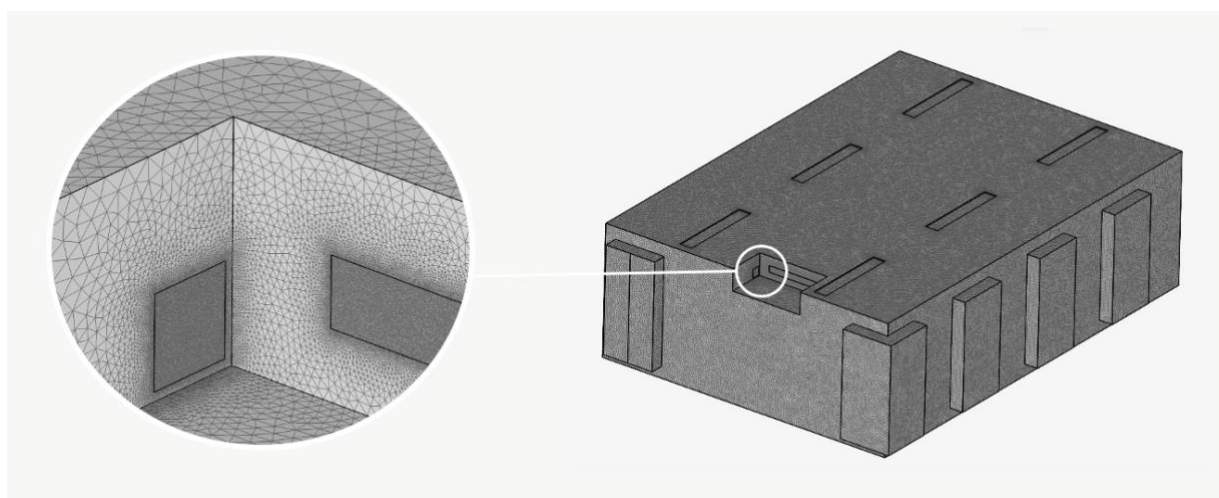
Inndata, rom 1S, 01.06.21, Sommerdag			
Parametere	Kl. 09:00	Kl. 14:00	Henvisning
Utetemperatur	19.1	23.6	Flisa II værstasjon
Innetemperatur	23.6	26.9	Omnisense
Differanse temperatur	4.5	3.3	-
innendørs RF	37.62	31.9	Omnisense
Met	1.2		Se tabell 3-15
Clo	0.5		Se tabell 3-15
Varmetilskudd mennesker	70 W/m ² hudoverflate		-
Varmetilskudd lys	30 W pr lampe		Antatt verdi, LED lys
Varme fra radiatorer	-		Anslått verdi
Temperaturvirkningsgrad	0.92		Se tabell 3-6
Temperatur innblåsingluft (t_2)	23.24	26.64	Se eksempelutregning
U-verdi glass	0.6		Se tabell 3-5
Overflatetemperatur vindu	23.25	26.0	Formel 3-2
U-verdi yttervegg	0.34		Se tabell 3-2
Overflatetemperatur innside yttervegg	23.1	26.5	Formel 3-2
Varmestrøm vindu. NV	128	129	Formel 2-7
Varmestrøm vindu. SV	70	81	Formel 2-7

3.4.2 Mesh-generering

For å kontrollere kvaliteten til simuleringsmodellen er det brukt to ulike virkemidler; grenseverdier fra mesh-loggen og konvergensplott. Dette delkapittelet tar for seg innstillinger for mesh, mens konvergensplottene er oppført i resultatdelen. For å oppnå virkelighetsnære resultater har meshkvaliteten stor betydning. Gjennom å dele inn domenet i rutenett (mesh) skapes punkter hvor programmet kan hente ut informasjon. Jo flere punkter, jo mer nøyaktig blir resultatet, men til gjengjeld tar simuleringen desto lengre tid. Målet med justering av grovheten til rutenettet er å finne mesh-uavhengige resultater. Altså punktet hvor løsninger har konvergert, og hvor du vil oppnå tilnærmet likt resultat ved enda finere mesh. Overflater med spesielle funksjoner har ofte behov for finere mesh(refinements) for å kunne gi nøyaktige resultater. I meshloggen oppgis grenseverdier for hva som anses som god kvalitet, og disse er brukt som en del av kvalitetssikringen av simuleringsmodellen. De ulike grenseverdiene er oppgitt i tabell 3-15, sammen med målte verdier. Visualisert mesh vises i figur 3-14.

Tabell 3-15 Mesh informasjon

Meshnavn: Endelig			
Finhetsgrad[1-10]		8	
Antall celler		7.5 M	
Antall noder		4.1 M	
Kontroll-parameter	Grenseverdier	Målt maksverdi	Gjennomsnitt
tetAspectRatio	<< 100	21.0	1.1
Non-orthogonality	<< 88	88.0	9.3
tetEdgeRatio	<< 100	49.9	1.7
VolumeRatio	<< 100	31.9	1.2
Overall mesh quality:	[0.035 – 1.0]	0.17	
Refinements			
Utkast og avtrekk	Mindre mesh-størrelse (region refinement)		
Resterende flater	Gradering av mesh-størrelse (inflate boundary layer)		



Figur 3-14 Meshet modell og refinement av utkast og avtrekk

3.5 Simulering av termisk komfort og energibruk

SIMIEN brukes i denne oppgaven til simulering av termisk komfort og beregning av energibruk, samt for å evaluere effekten av ulike tiltak. Tre ulike simuleringstyper er utført med ulikt formål (se tabell 3-16). Inndata er oppført i tabell 3-17 til 3-23 benyttet. Dimensjon på materialer er tatt fra detaljer tilsendt fra byggherre, og som er tegnet på nytt i figur 3-3 til 3-5 i kapittel 3.1.2.

Tabell 3-16 Simuleringer i SIMIEN

Simulert	Formål
Vinter og sommersimulering med reelle interne varmetilskudd	-Simulere termisk komfort i klasserom.
Vinter og sommersimulering med reelle interne varmetilskudd med justeringer etter tiltak	-Vise effekt av tiltak.
Helårsimulering av energibruk	-Vise tekniske systemer og konstruksjonens påvirkning på varmetap.

Inndata

Tabell 3-17 Anslått U-verdi for bygningsdeler

Bygningsdel	U-verdi	Referanse
Gulv mot grunn	0.23	Verdi fra lignende konstruksjon i SIMIEN, Betong(80 – 120 mm), 150 mm EPS/Steinul
Vindu	1.13	Glass 0.6, ink. Karm 1.13, Se tabell 3-5
Yttervegg	0.34	Se tabell 3-2
Etasjeskiller over 1. etg.	0.22	Se tabell 3-3
Etasjeskiller over 2. etg.	0.13	Se tabell 3-4

Tabell 3-18 g-faktor vinduer

Romnavn	Himmelretning	g-faktor	Forklaring
1N	Nord-Vest	0.45	Ingen skjerming
	Sør - Vest	0.45	Ingen skjerming
1S	Sør - Øst	0.1	Integrert solskjerming
	Sør - Vest	0.3	Innvendig rullgardin
2N	Nord - Vest	0.45	Ingen skjerming
	Sør - Vest	0.45	Ingen skjerming
2S	Sør - Øst	0.1	Integrert solskjerming
	Sør - Vest	0.3	Innvendig rullgardin

Tabell 3-19 Inneklimaparametere for simuleringer

Inneklima parametere		
Sesong	Met	Clo
Vinter	1.2	1
Sommer	1.2	0.5

Tabell 3-20 Interne varmetilskudd for komfortsimulering i klasserom i SIMIEN

Interne varmetilskudd			
Klasserom	Personer [W/m ²]	Teknisk utstyr [W/m ²]	Belysning [W/m ²]
1N	32	0	10

Tabell 3-21 Inndata for ventilasjon, komfortsimulering i SIMIEN

Luftmengde [m ³ /h]	Maks kapasitet varmebatteri [W/m ²]	Temperaturvirkningsgrad
600	4.2	0.8

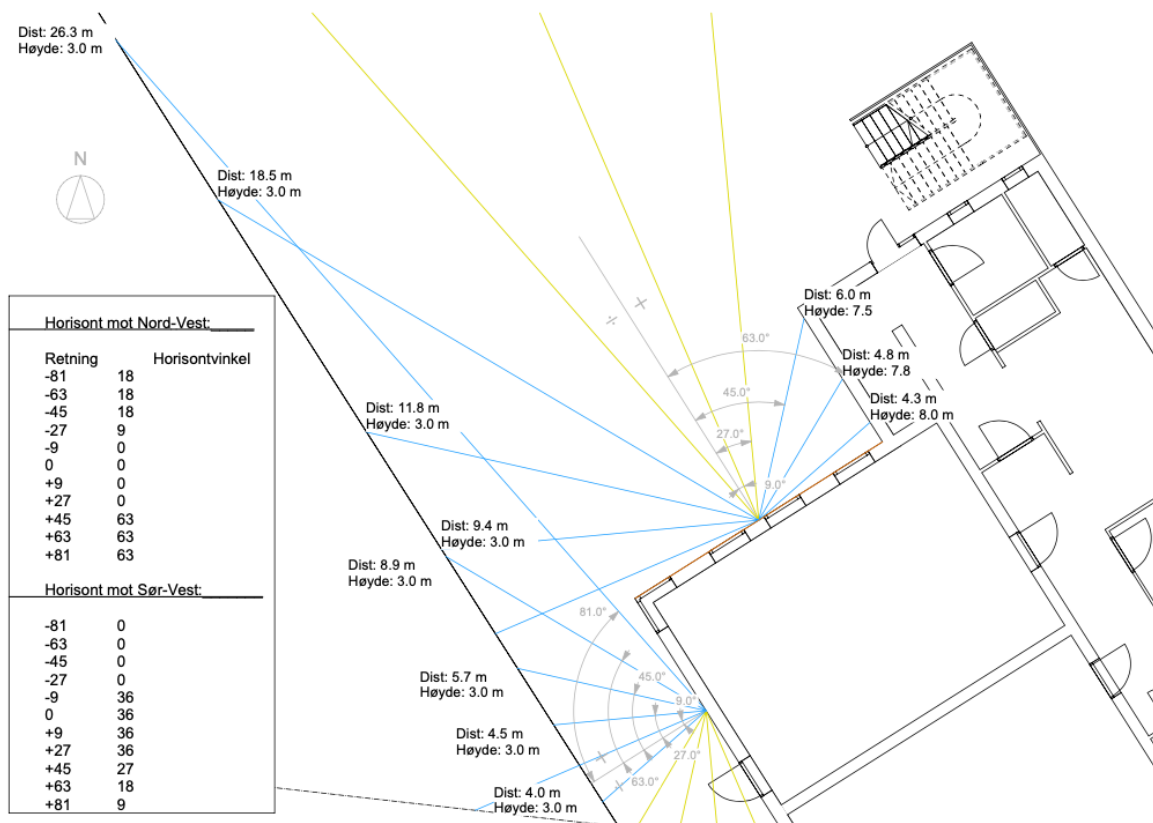
Tabell 3-22 Inndata for oppvarming, komfortsimulering i SIMIEN

Set-temperatur vinter	Set-temperatur sommer	Maks effekt radiator [W/m ²]
20	19	20

Tabell 3-23 Vinduslufting, komfortberegning SIMIEN

Lufteregime	Kommentar
Friminutt (9:30 – 9:45, 11 – 11:30)	Åpning av ett av de bunnhengslede vinduene
Sommer (mai – august, hel dag)	Åpning av tre av de bunnhengslede vinduene
Sommer (juni, 11-14)	Åpning av verandadør, halvt areal benyttet som luftareal

Beregnet horisontvinkel for de ulike fasadene til hvert klasserom er vist i figur 3-15. Archicad-modell laget av forfatter er brukt til å hente ut veiledende høyder og avstander. Horisontvinkel er avrundet til nærmeste mulige verdi i SIMIEN. Det er bare de nordlige rommene som har elementer i umiddelbar nærhet som påvirker horisont.



Figur 3-15 Kalkulasjon av horisont. Mål hentet fra Archicad-modell

Interne varmetilskudd

Beregning av interne varmetilskudd er forenklet, hvor standardverdi fra NS3031 er benyttet for belysning. Teknisk utstyr kan i noen tilfeller være en reell post i det interne varmetilskuddet grunnet bruk av datamaskin i undervisningen. I denne oppgaven er dette sett bort ifra da informasjon om bruksmønster er ukjent for forfatter. Varmetilskudd fra mennesker er beregnet gjennom bruk av verdi for metabolsk rate ved stillesittende aktivitet fra tabell 2-1, og ved bruk av formel 2-2 for beregning av duBois-areal. Det er her tatt utgangspunkt i middels vekt og høyde for et 13 år gammelt barn(Nettdoktor). Selv om det er et par ekstra barn i klasserommene i 2. etasje brukes samme interne varmetilskudd for begge klasserom.

$$A_s = 0.2 \times 42^{0.425} \times 1.54^{0.725} = 1.3 \text{ m}^2$$

Internt varmetilskudd personer =

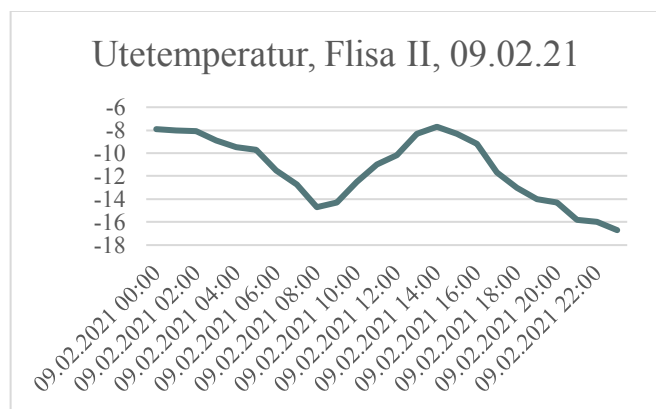
$$\frac{1.3 \text{ m}^2 \times 70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 25 \text{ personer}}{70 \text{ m}^2} \approx 32 \text{ W/m}^2$$

Inndata uteklima

Simulering av en sommerdag er gjort ved å benytte n50_dimenjonerende døgn for første juni. Uteklimate denne dagen har svært god overenstemmelse med uteklimate målt ved Flisa værstasjon.

Dimensjonerende uteklimateverdier fra SIMIEN på vinterstid (09.februar) er mye kaldere enn de målte verdiene fra Flisa II værstasjon. For å validere simuleringen er det derfor lagt inn eget uteklimate, som presentert i tabell 3-24.

Tabell 3-24 Inndata Uteklimate i SIMIEN 09.02.01



Inndata uteklimate 09.02.21	Verdi
Transmissivitet atmosfære(antatt)	0.89
Midlere vindhastighet[m/s]	1.3
Markrefleksjonsfaktor (antatt snø)	0.6
CO ₂ [ppm]	380
Døgnmiddeltemperatur	-11.8
Temperaturamplitude	3.5
Tidspunkt maks temp.	14:00
Vanndampinnhold luft[k/kg]	0.7

3.5.1 Inndata tiltak, utvendig solskjerming

Inndata for tiltak, og utvendig solskjerming er vist i tabell 3-25.

Tabell 3-25 ny g-faktor, etter tiltak med utvendig solskjerming

Romnavn	Stilling	g-faktor	Forklaring
1N Fasade: Sør-Vest	Aktivert	0.05	Manuell styrt, utvendig solskjerming med lyse lameller
	Deaktivert	0.45	Ingen solskjerming

3.5.2 Inndata energisimulering

Soneinndeling

For å simulere energibruken til bygningen ble bygningen inndelt i soner, som vist i tabell 3-26. I alle rom utenom klasserommene ble det lagt inn standardverdier for varmetilskudd etter NS-3031. Disse er oppført i tabell 3-27 og 3-28.

Tabell 3-26 Oversikt arealer for hver sone

Soner	Gulvareal[m ²]
Klasserom 1N	72.5
Klasserom 2N	72.5
Klasserom 1S	72.5
Klasserom 2S	72.5
Grupperom	67
Gang	140
WC	26
Teknisk rom	21
Total	544

Tabell 3-27 Interne varmetilskudd i bygninger

Interne varmetilskudd			
Bygningskategori	Belysning [W/m ²]	Utstyr [W/m ²]	Personer [W/m ²]
Alle soner	10	6	12

Tabell 3-28 Gjennomsnittlig effektbehov

Effektbehov			
Bygningskategori	Belysning [W/m ²]	Utstyr [W/m ²]	Varmtvann [W/m ²]
Alle soner	10	6	4.5

4 Resultater

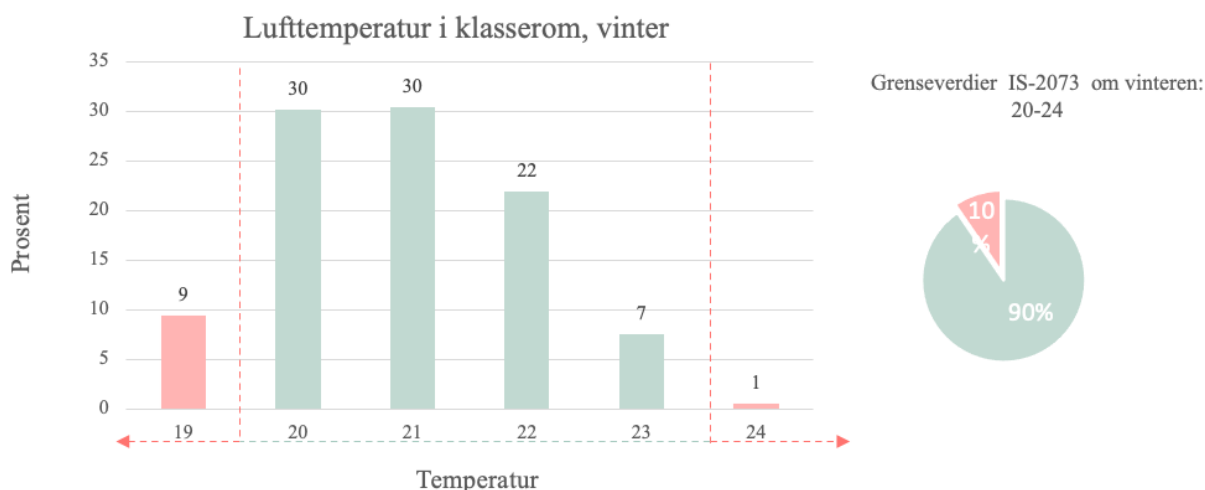
4.1 Vurdering av termisk komfort i klasserom gjennom sensormålinger

Omnisense-datasettene er brukt til å dokumentere de reelle termiske forholdene i klasserommene på Hanstad skole, og for å vurdere tilstanden opp mot anbefalinger og krav. Det er i hovedsak termisk komfort i form av innvendig lufttemperatur som er studert, men også innendørs relativ luftfuktighet blir kommentert. Dette kapittel består av seks ulike deler:

- 1) vurdering av termisk komfort i klasserom etter forskrift om miljørettet helsevern
- 2) vurdering av termisk komfort i klasserom etter SN-CEN/TR 16798-2:2019
- 3) variasjon i innvendig lufttemperatur mellom rommene
- 4) variasjon i innvendig lufttemperatur innad i hvert rom
- 5) variasjon i innvendig lufttemperatur ut ifra overflatebehandling til massivtre
- 6) tilstand med tanke på innendørs relativ luftfuktighet i klasserom

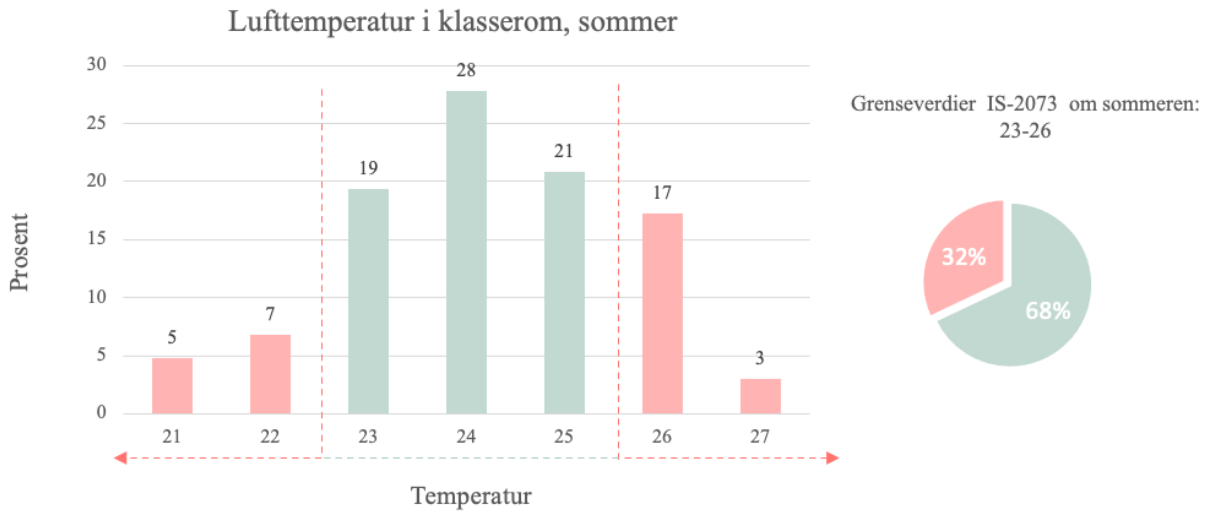
4.1.1 Vurdering av termisk komfort i klasserom etter forskrift om miljørettet helsevern

Figur 4-1 viser sensormålinger av innvendig lufttemperatur på vinterstid, og andel av målinger som er innenfor kravene gitt i forskrift om miljørettet helsevern. 9 % er kaldere enn grensen, og 1 % er varmere. Totalt er 10 % utenfor kravene, og 90 % innenfor akseptabelt nivå.



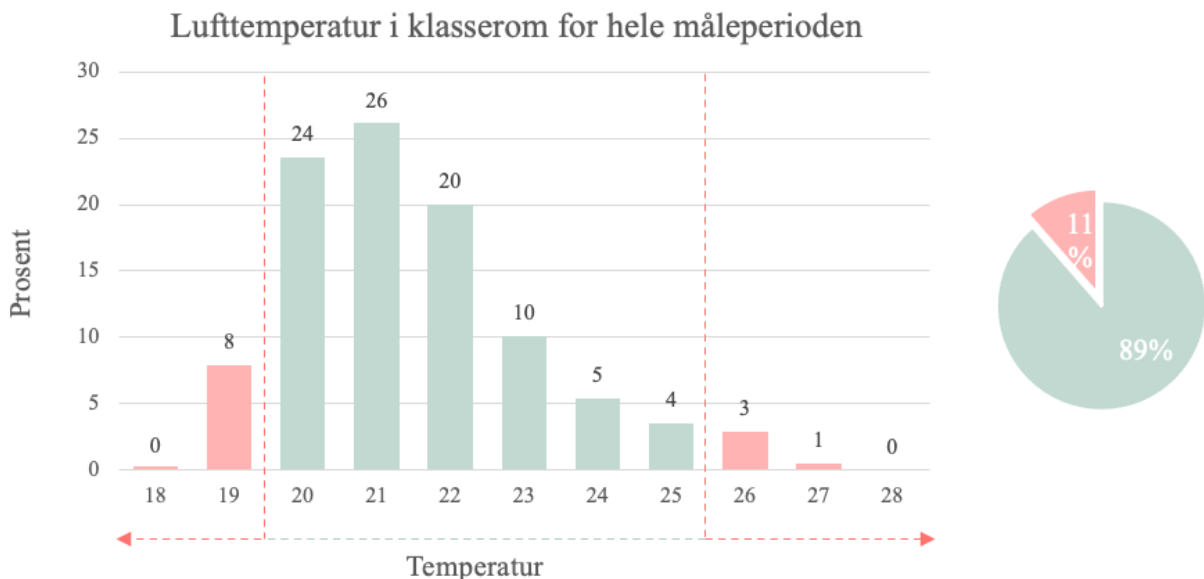
Figur 4-1 Sensormålinger av innendørs lufttemperatur mot vinterkrav fra forskrift om miljørettet helsevern

Figur 4-2 viser sensormålinger av innvendig lufttemperatur på sommerstid, og andel av målinger som er innenfor kravene gitt i forskrift om miljørettet helsevern. 12 % er kaldere enn grensen, og 20 % er varmere. Totalt er 32 % utenfor kravene, og 68% innenfor akseptabelt nivå.



Figur 4-2 Sensormålinger av lufttemperatur innendørs mot sommerkrav fra forskrift om miljørettet helsevern

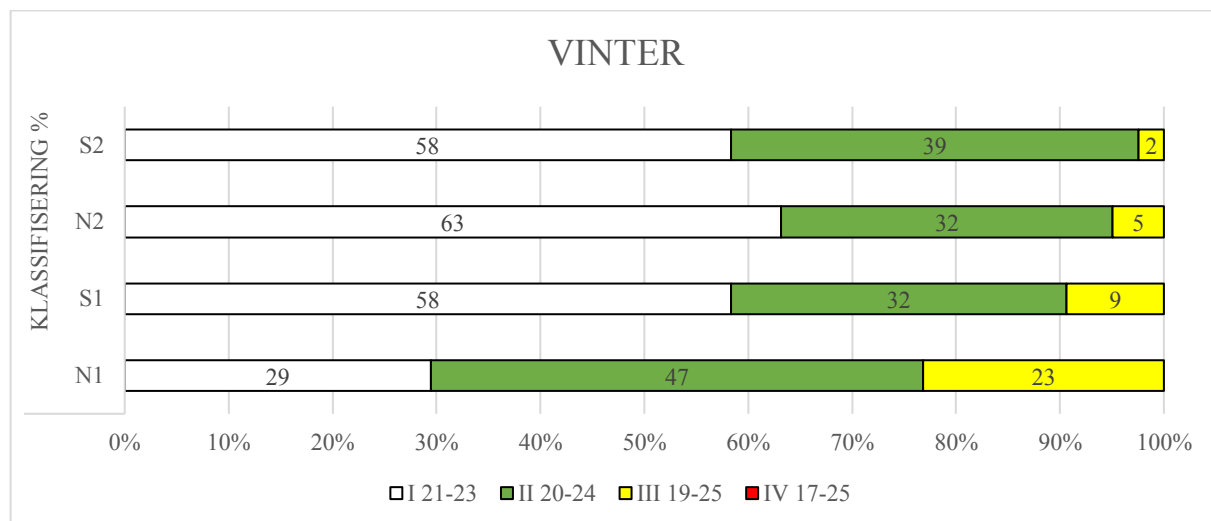
Figur 4-3 viser sensormålinger av innvendig lufttemperatur for hele måleperioden, og andel av målinger som er innenfor ytterkravene gitt i forskrift om miljørettet helsevern. Det vil si innenfor 'laveste grenseverdi gitt i vinterenkrav og høyeste grenseverdi gitt i sommerkrav. 8 % er under grensen (for kaldt), og ≈ 4 % er varmere enn grensen (for varmt). Totalt er ca. 11 % utenfor kravene, og 89 % innenfor akseptabelt nivå.



Figur 4-3 Sensormålinger av innendørs lufttemperatur for hele måleperioden mot yttergrenser fra forskrift om miljørettet helsevern

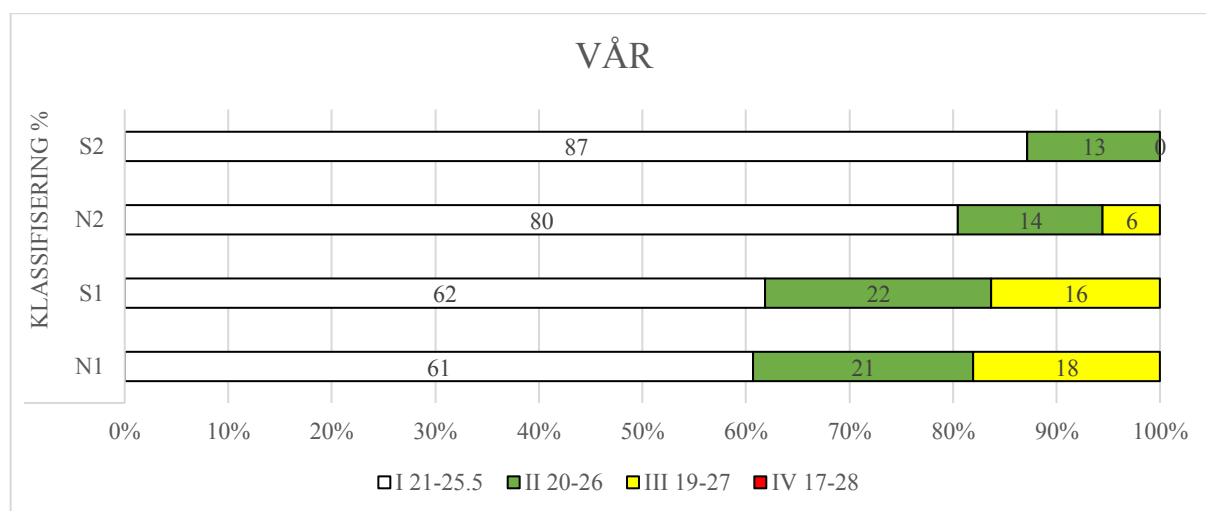
4.1.2 Vurdering av klasserom etter SN-CEN/TR 16798-2:2019

Figur 4-4 til 4-6 viser klassifisering av de ulike rommene etter sesong. Figur 4-4 viser vinterklassifisering av rommene, med grenser gitt i underkant av figur. Fra figuren ser vi at ingen av rommene har målinger i kategori IEQ_{IV}. Rom N1 har størst andel målinger i kategori IEQ_{III}, mens rom S2 har minst.



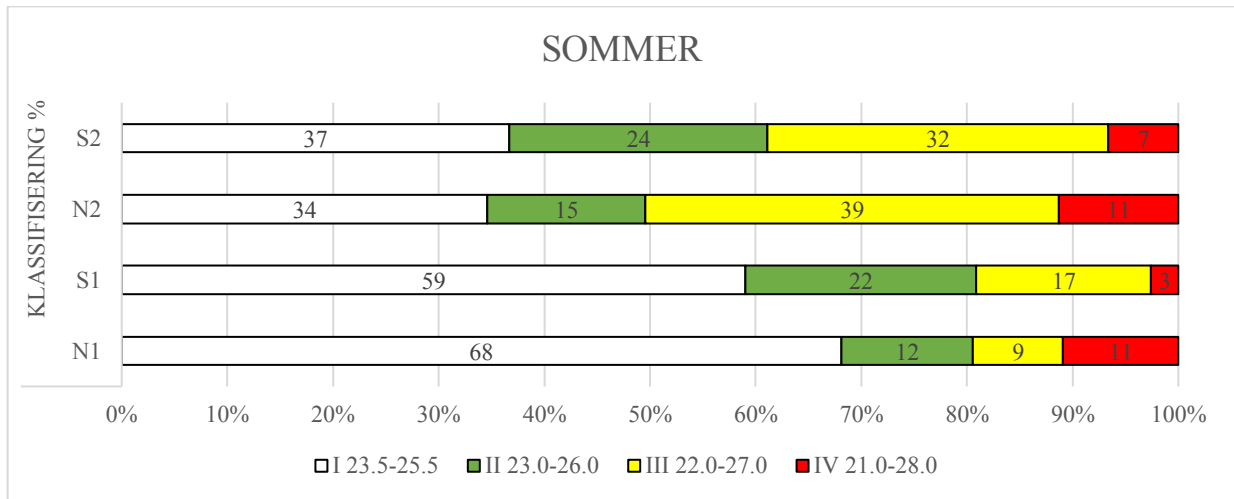
Figur 4-4 Klassifisering av de ulike rommene på vinterstid

Figur 4-5 viser vår-klassifisering av rommene. Samme tendens kommer frem i denne figuren som i figur 4-4. Rom N1 har størst andel målinger i kategori IEQ_{III}, mens rom S2 har minst.



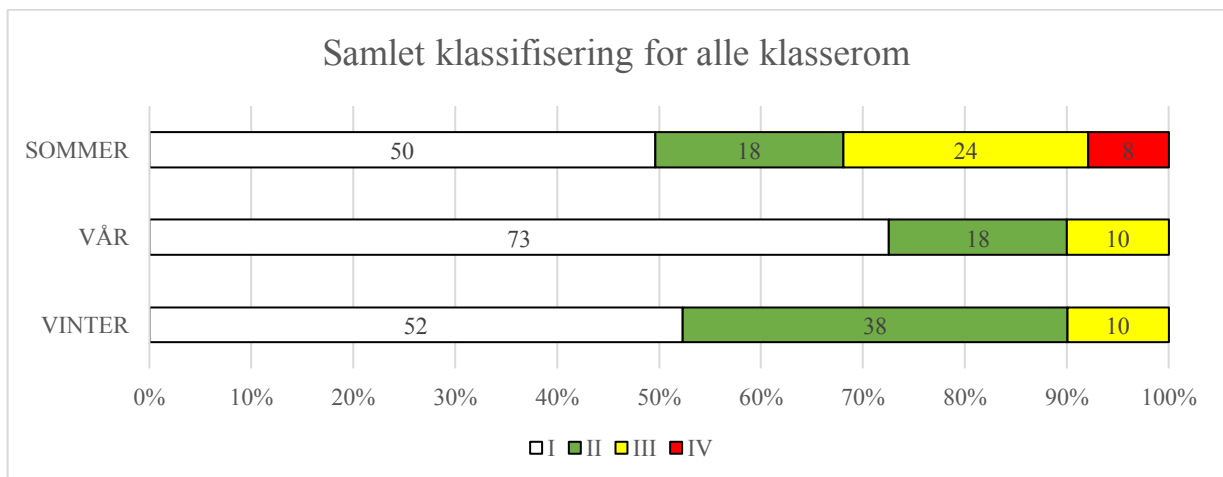
Figur 4-5 Klassifisering av de ulike rommene på våren

Figur 4-6 viser sommerklassifisering av rommene. Figuren viser at alle rommene har målinger i kategori IEQ_{IV}. Rom 1N har størst andel målinger i kategori IEQ_{IV} men har på motsatt side flest målinger innenfor kategori IEQ_I. Ser man på kategori IEQ_{III} og IEQ_{IV} sammenlagt, har rom N2, deretter S2 størst andel av målinger innenfor disse kategoriene.



Figur 4-6 Klassifisering av de ulike rommene på sommertid

Figur 4-7 viser samlet klassifisering for klasserommene delt inn etter sesong. Her er ikke grensene oppgitt under figur, da hver kategori har ulik grense for hver sesong. Se figur 4-4 for grenser for vinter, og figur 4-6 for grenser for sommer. Figur 4-7 viser at det bare er om sommeren at det måles verdier innenfor kategori IEQ_{IV}, og at dette samlet for alle klasserommene utgjør 8 %. Våren har størst andel målinger i kategori IEQ_I.



Figur 4-7 Samlet termisk vurdering for klasserommene

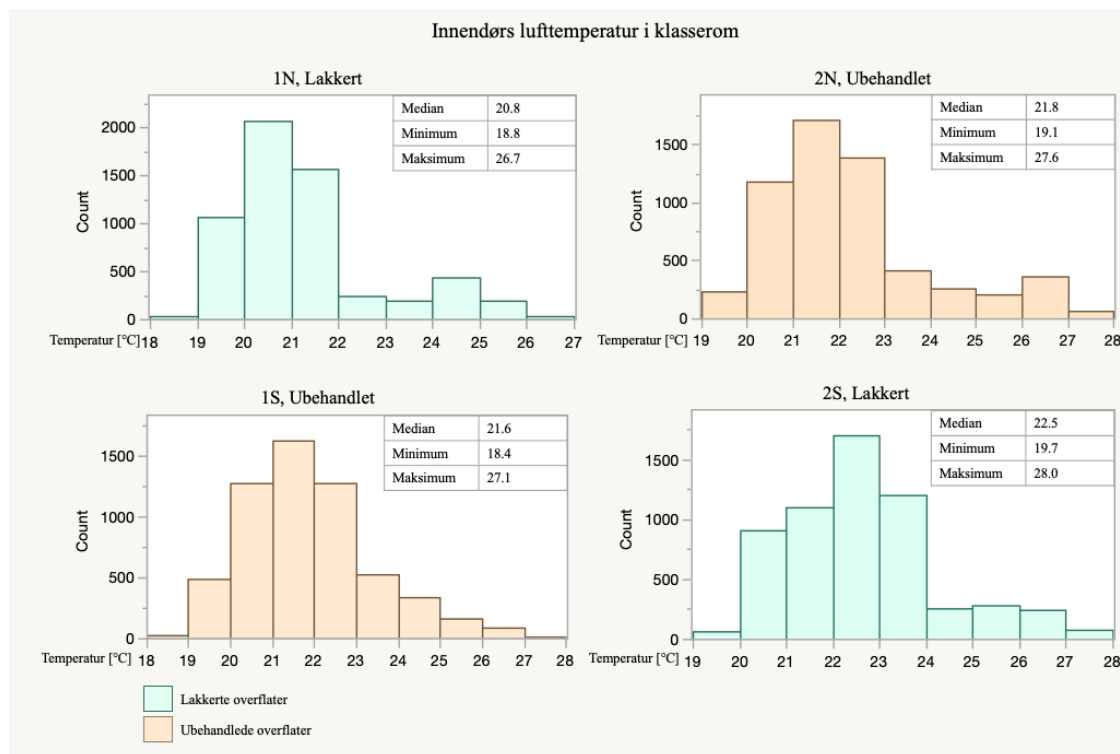
Ettersom kategori IEQ_{IV} både inneholder lave og høye målinger er det laget en oversikt for å skille dette fra hverandre, for å kartlegge problemene lettere (se tabell 4-1). På vinterstid har ingen av rommene målinger i IEQ_{IV}. Det er derfor gjort en kartlegging av fordelingen i kategori IEQ_{III} i istedenfor. På vinterstid er det høyest andel av målinger med lav innetemperatur i rommene i 2. etasje. Rom 1N utpeker seg spesielt, med hele 24%. På sommerstid er det høyest andel målinger med høy temperatur i rom S2. Rom 2N har en tilnærmet lik andel.

Tabell 4-1 Fordeling av målinger i kategori IEQ_{III} på vinteren og kategori IEQ_{IV} på sommeren

Rom	Vinter, fordeling IEQ _{III}			Sommer IEQ _{IV}		
	<20	>24	≈ sum % i EQ _{III}	<22	>27	≈ sum % av IEQ _{IV}
S2	1,4	1,3	3	0,5	6,1	7
N2	4,6	0,5	5	6,5	5,4	12
S1	9,6	0,3	10	2,2	0,5	3
N1	24,2	0,0	24	11,5	0,0	12

4.1.3 Variasjon i innvendig lufttemperatur mellom klasserom

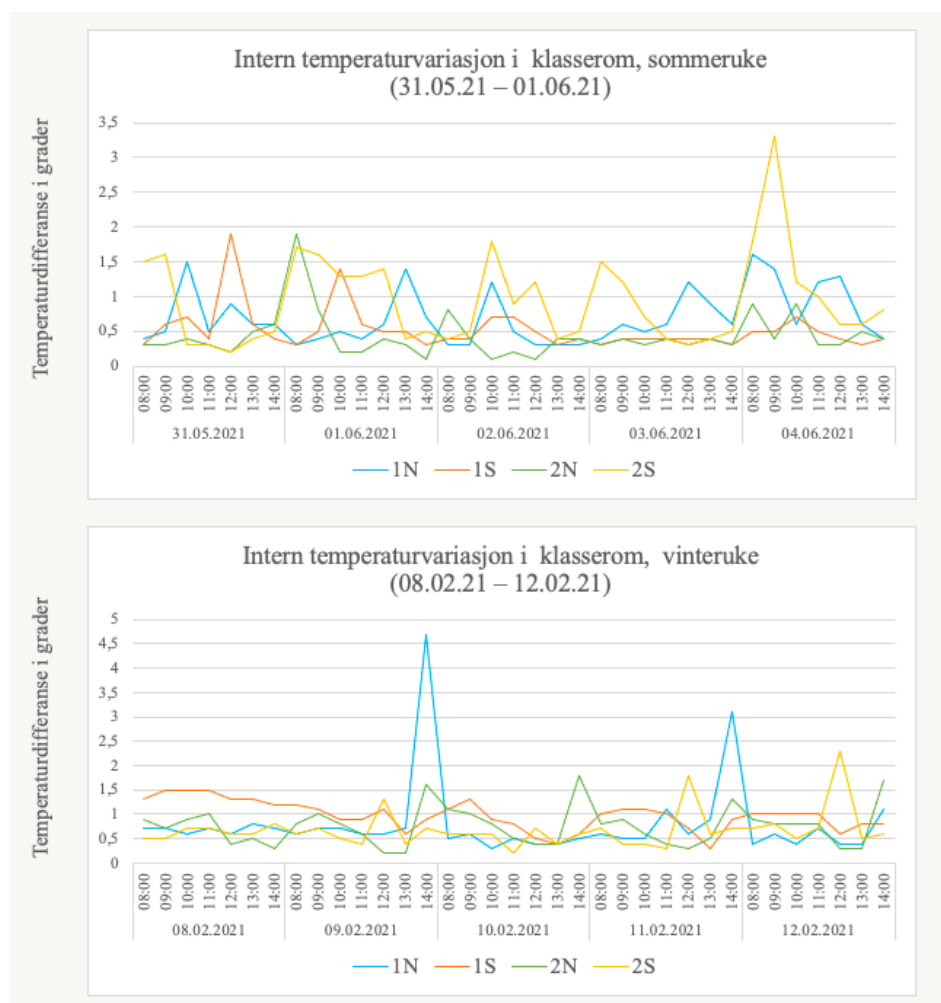
Oversikt over fordelingen til målt lufttemperatur for hvert klasserommene er gitt i figur 4-8. Rommene mot sør har tilnærmet normalfordeling, mens rommene mot nord er venstretung med høyere ekstremverdier. Medianen er høyest i rommene i 2. etasje, hvor lakkert rom har høyest verdi. Minimumsverdien er lavest i rommene i 1. etasje, hvor ubehandlet rom har lavest verdi. Rommene mot nord har de høyeste maksimumsverdiene, hvor ubehandlet rom i 2. etasje har høyest verdi.



Figur 4-8 Fordeling av innendørs lufttemperatur i hvert klasserom

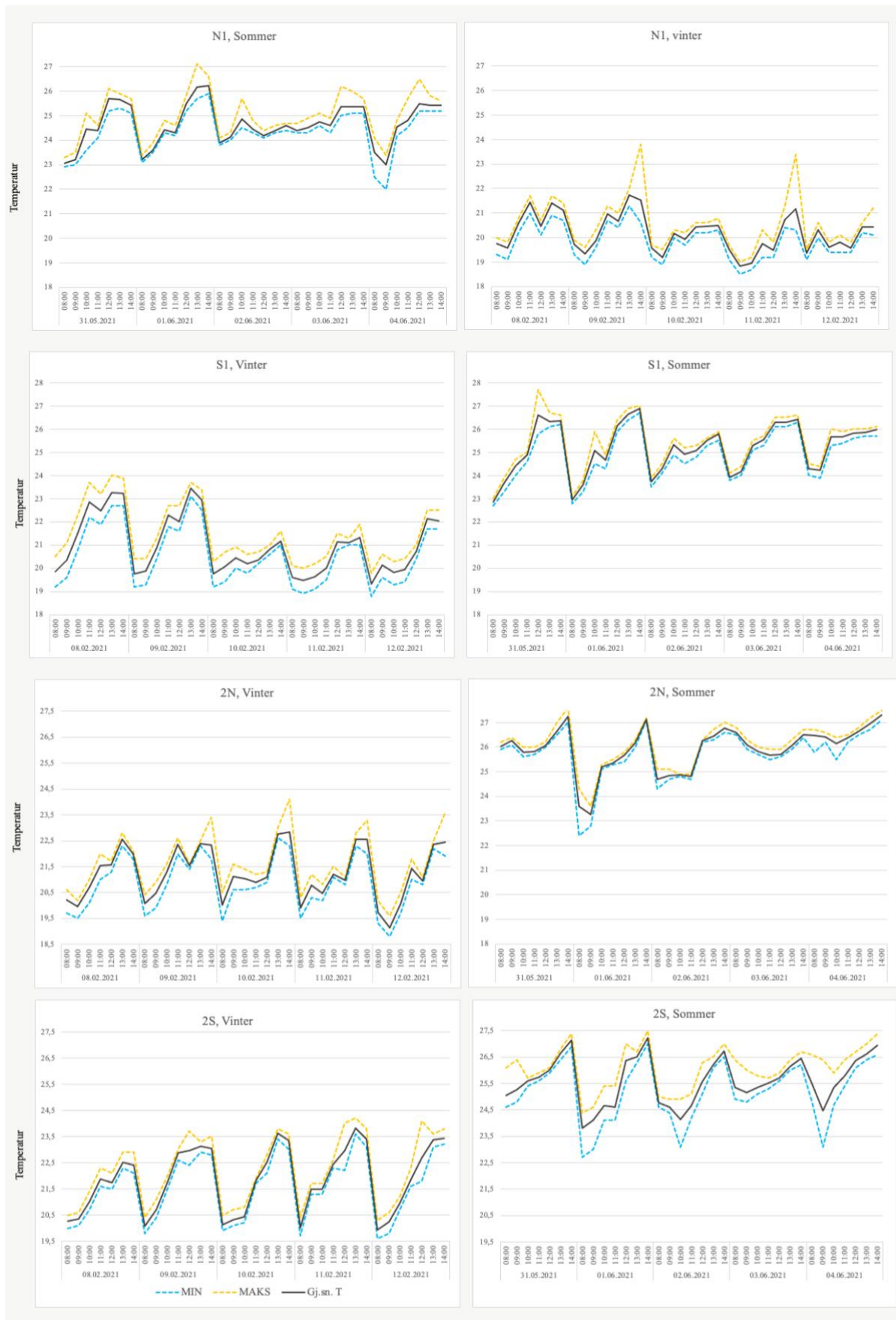
4.1.4 Variasjon i lufttemperatur innad i rommene

Figur 4-9 viser hvor mange grader forskjell det er mellom sensorene i et rom i en valgt vinter- og sommeruke. Av figuren ser vi at det generelt sett er mer stabilt på vinterstid, men at det er mer ekstreme utslag på vinterstid enn på sommerstid, hvor det kan være nesten 5 graders forskjell innad i et rom. Størst forskjell opptrer fortrinnsvis mot slutten av dagen og i rom 1N. På sommeren er 3 grader maksimalt spenn innad i rommene. På sommerstid er det ingen klare deler av dagen hvor variasjonen er størst.



Figur 4-9 Temperaturdifferanser innad i klasserom

Figur 4-10 er bakgrunnen for hvordan figur 4-9 er dannet. Den viser minimumstemperatur og maksimumstemperatur innad i gruppen med sensorer for hvert rom, samt gjennomsnittet. Variasjonen vist i figur 4-9 er differansen mellom minimum og maksimumsverdier fra denne figuren.

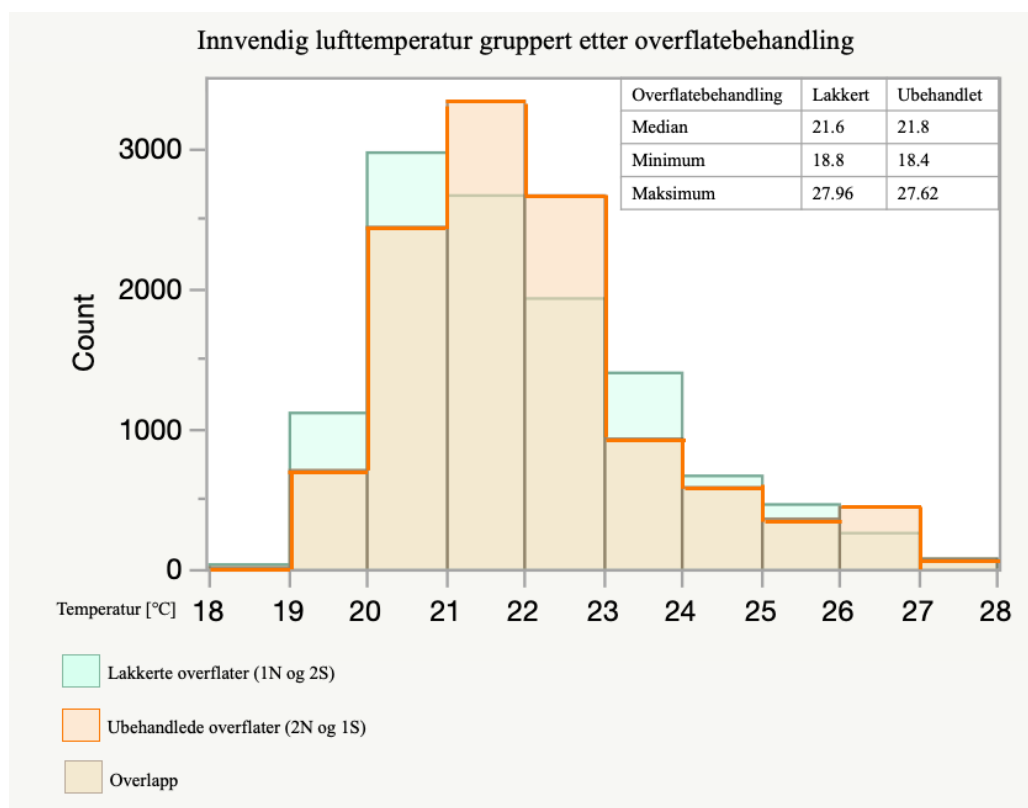


Figur 4-10 Gjennomsnitt-, minste- og maksimumstemperaturer i hvert klasserom

4.1.5 Variasjon mellom behandlingene

I figur 4-11 representerer grønt histogram de lakkerte klasserommene, og oransje histogram representerer klasserommene uten overflatebehandling. De to gruppene består av data fra 10 sensorer hver, 5 fra hvert klasserom.

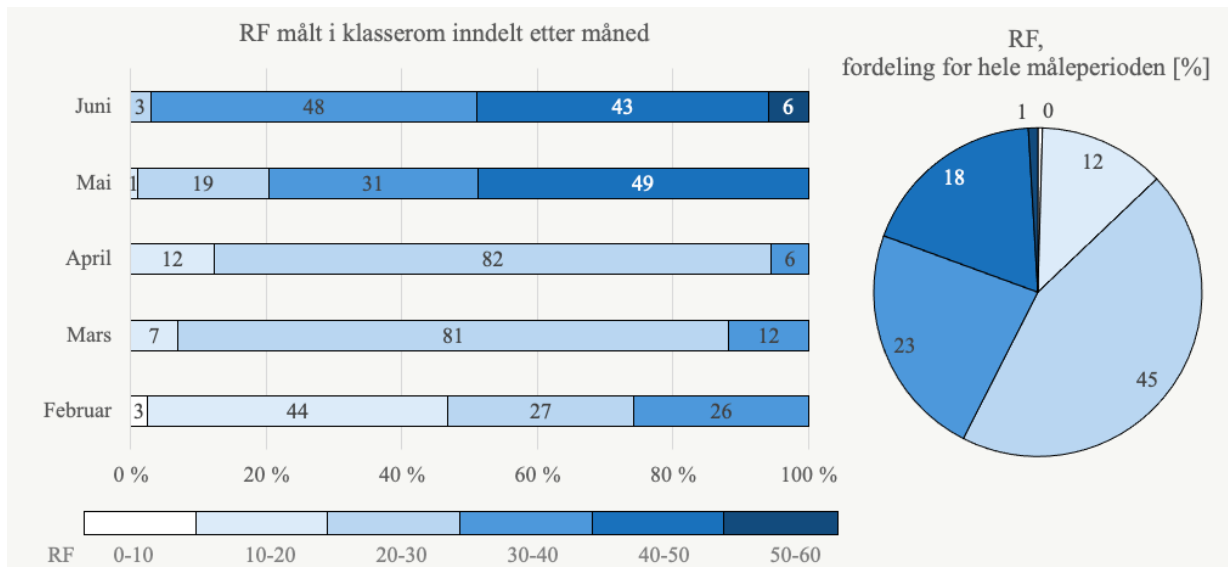
Histogrammene til de to gruppene har ganske lik form, og ingen av de er normalfordelte. Klasserom med ubehandlede overflater har flest målinger mellom 21 og 22 grader, mens klasserom med ubehandlede overflater har størst målinger mellom 20 og 21 grader. 0,2 grader skiller medianen til de to gruppene.



Figur 4-11 Lufttemperatur gruppert etter overflatebehandling

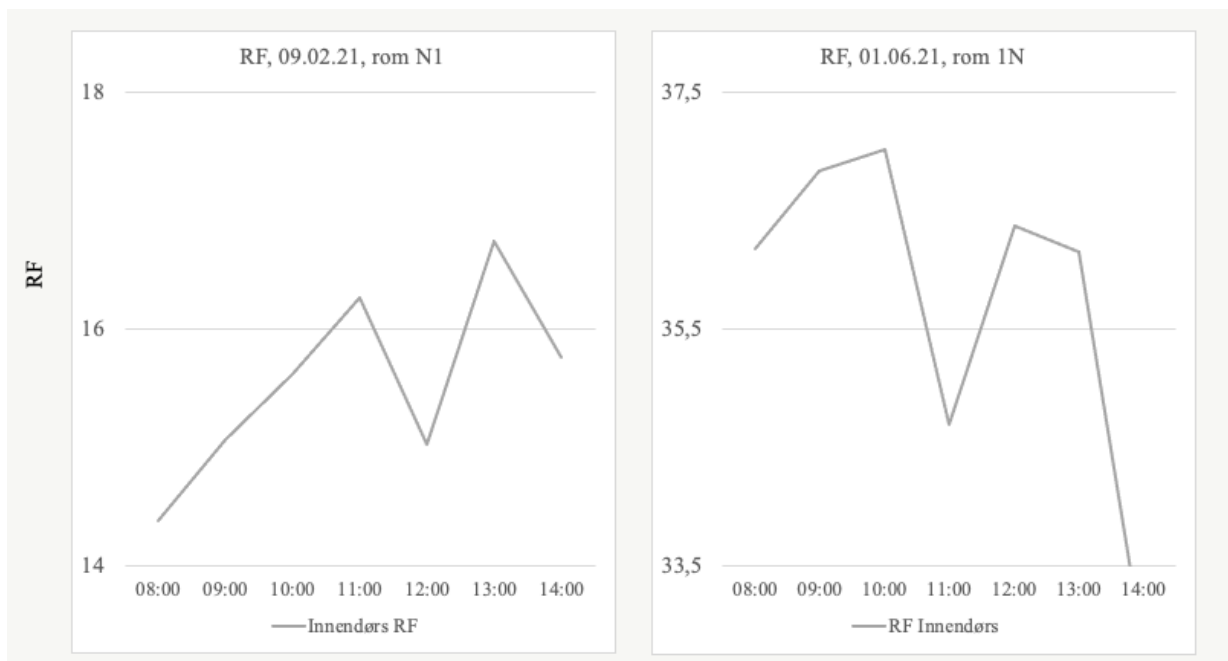
4.1.6 Vurdering av innendørs relativ luftfuktighet i klasserom

Figur 4-12 viser en samlet oversikt over målt RF innendørs i klasserommene. Figuren viser at det er målt lavest innvendig RF på vinteren, og at RF stiger utover i semesteret. I februar er hele 44 % av målt RF i intervallet 10-20%. I forskrift om miljørettet helsevern er det ikke gitt anbefalinger til grenseverdier for RF. I målinger fra klasserommene er 12% under anbefalt nivå totalt. På vinterstid er 47 % under anbefalt nivå.



Figur 4-12 Oversikt over relativ luftfuktighet inndelt etter måned, samt oversikt for hele perioden

Figur 4-13 viser variasjon i RF på en varm og en kald dag. Variasjonen er mindre på vinteren enn om sommeren og varierer med ca. 2%. På en sommerdag varierer den med ca. 3%.



Figur 4-13 Variasjon i innvendig RF gjennom skoledagen for en varm og kald dag

4.2 Vurdering av termisk komfort gjennom simulering i SIMSCALE

I dette kapittelet presenteres resultater fra simuleringer i Simscale.

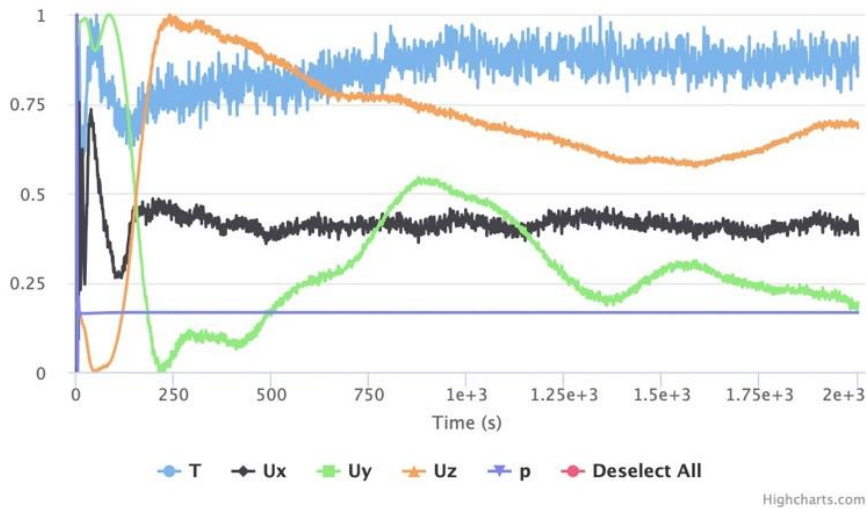
4.2.1 Validering av simulering

For validering av simuleringsmodell ble konvergensplottene til hver enkelt simulering undersøkt. Et konvergensplott viser stabiliteten til løsningen for ulike deler av modellen. Er det mye svingninger vil resultatene bære preg av stor grad av usikkerhet. I figur 4-14 er plottene vist, først plott for hele modellen, så vegger, utkast og avtrekk. Til sist har vi residualplottene, som viser antall numeriske feil opp mot antall iterasjoner.

Av figuren ser vi at plott for avkast for rom 1N er ustabil. Det er derfor kjørt en simulering med dobbelt så mange iterasjoner for å kontrollere at løsningen konvergerer til slutt. Simulering ved 1000 iterasjoner, vist i figur 4-14, tok i underkant av fire timer, og kontrollsimulering med 2000 iterasjoner (figur 4-15) tok ytterligere tre timer. Løsningen her er mye mer stabil og er mye nærmere konvergens. I de neste kapitlene vil resultater fra simuleringene på 1000 iterasjoner fremlegges. I tabell 4-2 er målinger fra konvergent løsning for rom 1N lagt ved for å vise at konvergent løsning ligger svært nærme reelle målinger. Simulert gjennomsnitt avviker med 0.05 grader fra målt gjennomsnitt. Disse verdiene er ikke benyttet i visualiseringer da resultatene ved 1000 iterasjoner er nærme nok målte sensorverdier.



Figur 4-14 Konvergensplott



Figur 4-15 Konvergensplott for avkast for N1 kl. 09 med 2000 iterasjoner

Tabell 4-2 viser målte verdier fra Omnisense-sensorer opp mot simulerte verdier. Målepunkter i simuleringmodellen er markert ut etter figur 3-8.

Å oppnå den eksakt samme temperaturen er utfordrende, da svært mange faktorer spiller inn. Årsaker kan være avvik grunnet manglende informasjon om sensorutplassering, usikkerhet rundt input-verdier og løsninger som divergerer. Simuleringer på vinterstid i rom 1N avviker med 0.7 grader på morgenen og 0.4 på ettermiddagen. På sommerstid i rom 1S er avviket 0.7 grader om morgenen og 0.1 på ettermiddagen. Begge simuleringer på sommerstid har verandadør halvt åpen, da drift har opplyst at det ble luftet gjennom hele skoledagen på sommeren.

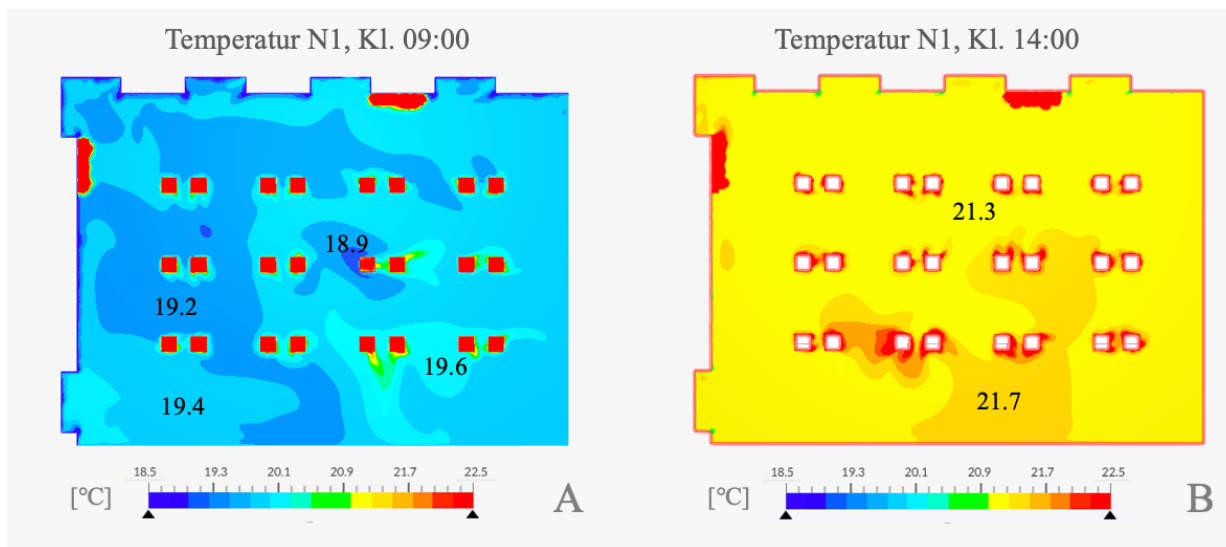
Tabell 4-2 Lufttemperatur innendørs fra sensormålinger og simuleringer

Rom 1N, 09.02.21 Temperatur							
	Kl.	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Gjennomsnitt
MÅLT	09:00	19.5	19.4	19.3	18.9	19.6	19.34
SIM 1000	09:00	18.64	18.64	18.55	18.66	18.90	18.68
						Differanse 1000	0.66
SIM 2000	09:00	19.31	19.30	19.32	19.40	19.13	19.29
						Differanse 2000	0.05
MÅLT	14:00	21	20.6	25.3	21	21.2	21.82
SIM 1000	14:00	21.43	21.39	21.32	21.45	21.73	21.46
						Differanse	0.36
Rom 1S, 01.06.21 Temperatur							
	Kl.	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Gjennomsnitt
MÅLT	09:00	23.8	23.3	23.7	23.7	23.5	23.6
SIM 1000	09:00	22.78	22.96	22.86	22.67	22.67	23.22
						Differanse 1000	0.7
MÅLT	14:00	27	26.9	27	26.9	26.7	26.9
SIM 1000	14:00	26.61	26.83	26.72	26.65	27.05	26.77
						Differanse 1000	0.13

4.2.2 Termisk komfort i oppholdssonen

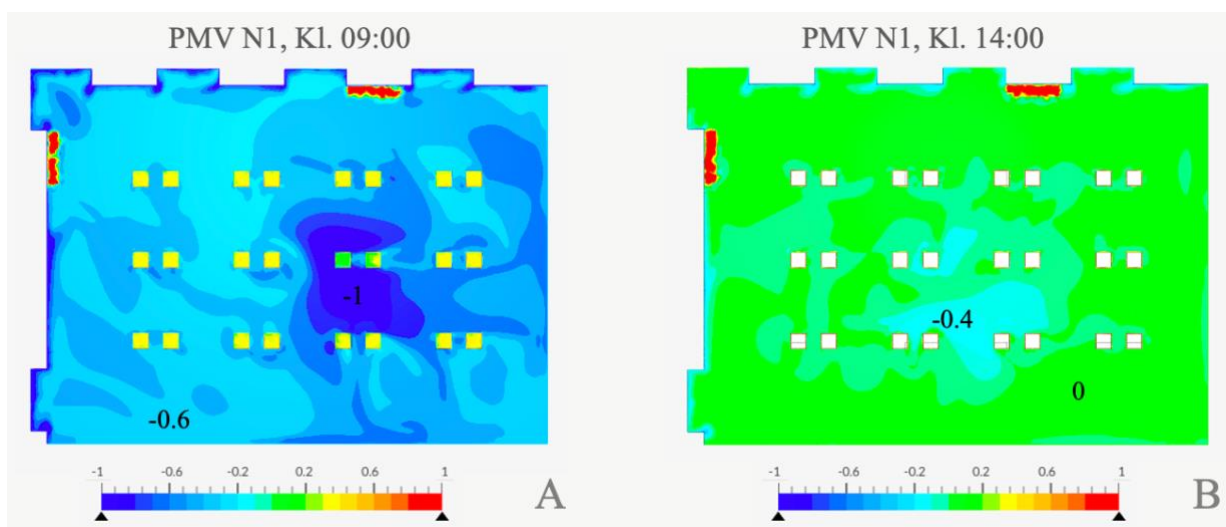
Vinterstid

Som nevnt skal termisk komfort for sittende personer måles i en høyde på 0.6 m. Figur 4-16 til 4-18 viser de termiske forholdene for rom 1N, 9. februar 2021 klokken 09 og klokken 14 i dette planet. Figur 4-16 A viser at bakre del (mot fasade) av rommet er kaldest. Omtrent midt i rommet oppstår en ekstra kald sone hvor det er ca. 18 grader. Figur 4-16 B viser at temperaturen øker utover skoledagen, og at temperaturvariasjonen er mindre.



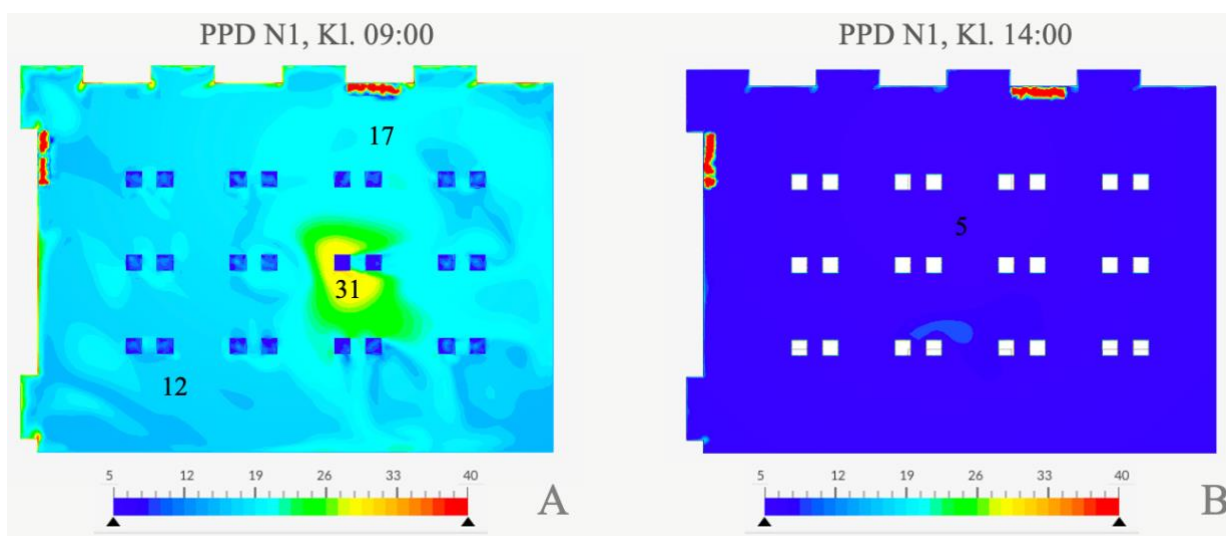
Figur 4-16 Simulering av lufttemperatur i rom 1N om vinteren i Simscales

Figur 4-17 A viser PVM på morgenen. Den kalde sonen i midten av rommet viser enda tydeligere på denne figuren enn i figur 4-16 A. Ifølge simuleringen vil elever i nærheten av sonen vil oppleve en asymmetri i termisk komfort. I figur 4-17 B ser vi at mesteparten av rommet er termisk nøytralt mot slutten av skoledagen.



Figur 4-17 Simulering av PMV i rom 1N om vinteren i Simscales

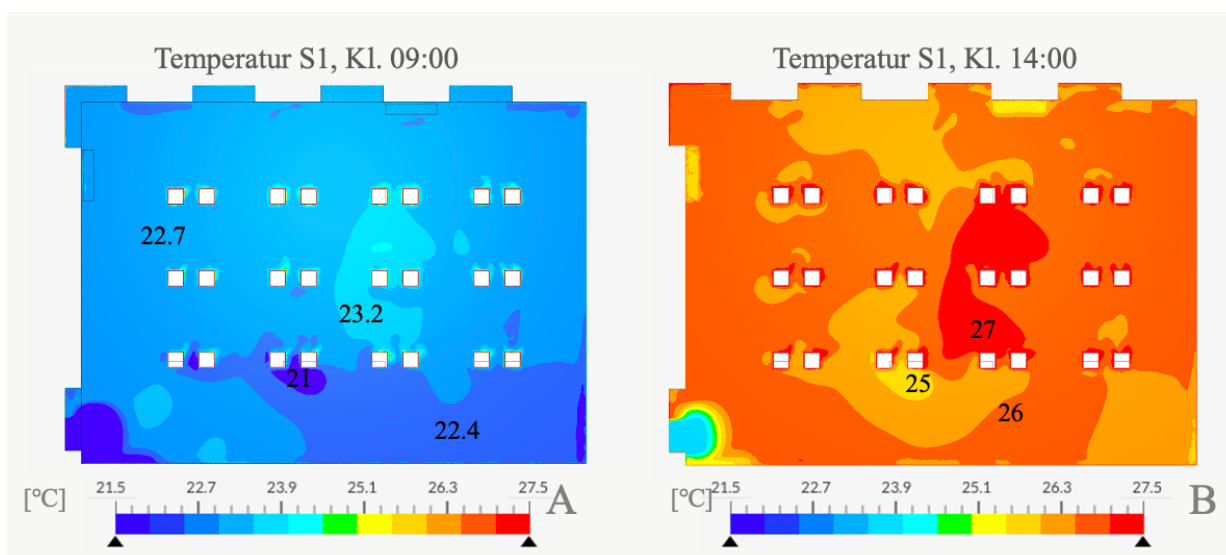
Figur 4-18 A og B viser simulert PPD ved starten og slutten av skoledagen. Simulert PPD i rommet varierer fra rundt 12% til 31% på starten av dagen. Mot slutten av dagen er det ingen variasjon i termisk komfort innad i rommet.



Figur 4-18 Simulert PPD i rom 1N om vinteren i Simscale

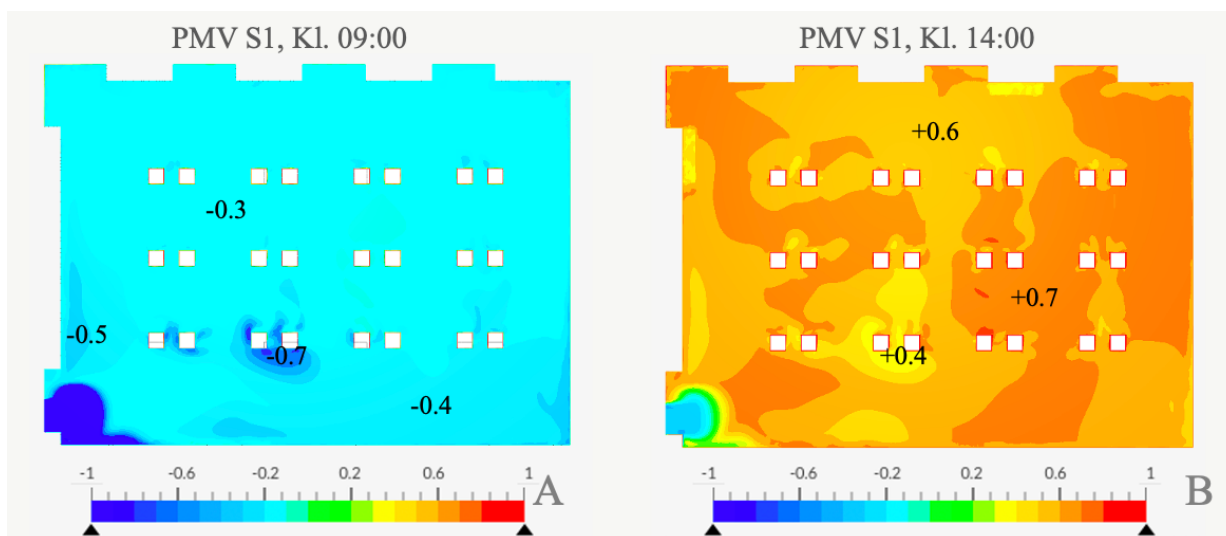
Sommerstid

Figur 4-19 til 4-21 viser de termiske forholdene i planet (0.6 m over gulv) for rom 2S på sommerstid. Figur 4-19 viser simulert lufttemperatur klokken 09 og 14. Fra figuren ser vi at lufttemperaturen er høy fra morgenen av, og ender opp på maksimalt 27 grader. Total variasjon i simulert lufttemperatur er ca. 2 grader for begge tidspunktene.



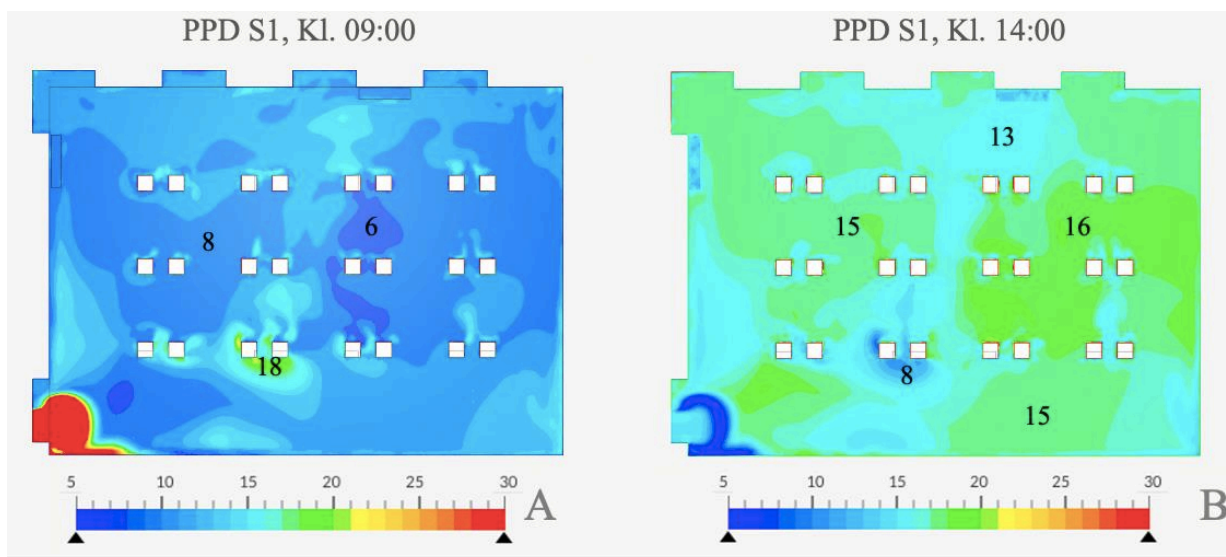
Figur 4-19 Simulering av lufttemperatur i rom 1S om sommeren i Simscale

I Figur 4-20 vises simulert PMV. Om morgenen er laveste PMV -0.7, mens det om ettermiddagen er maksimalt +0.7. Slik som for rom 1N på vinterstid er det også her en kaldere sone mot midten av rommet.



Figur 4-20 Simulering av PMV i rom 1S om sommeren i Simscale

Figur 4-21 viser PPD. Om morgenen er PPD maksimalt 18 grunnet kulde, mens det på ettermiddagen er PPD rundt 16 grunnet ubehag fra varme.



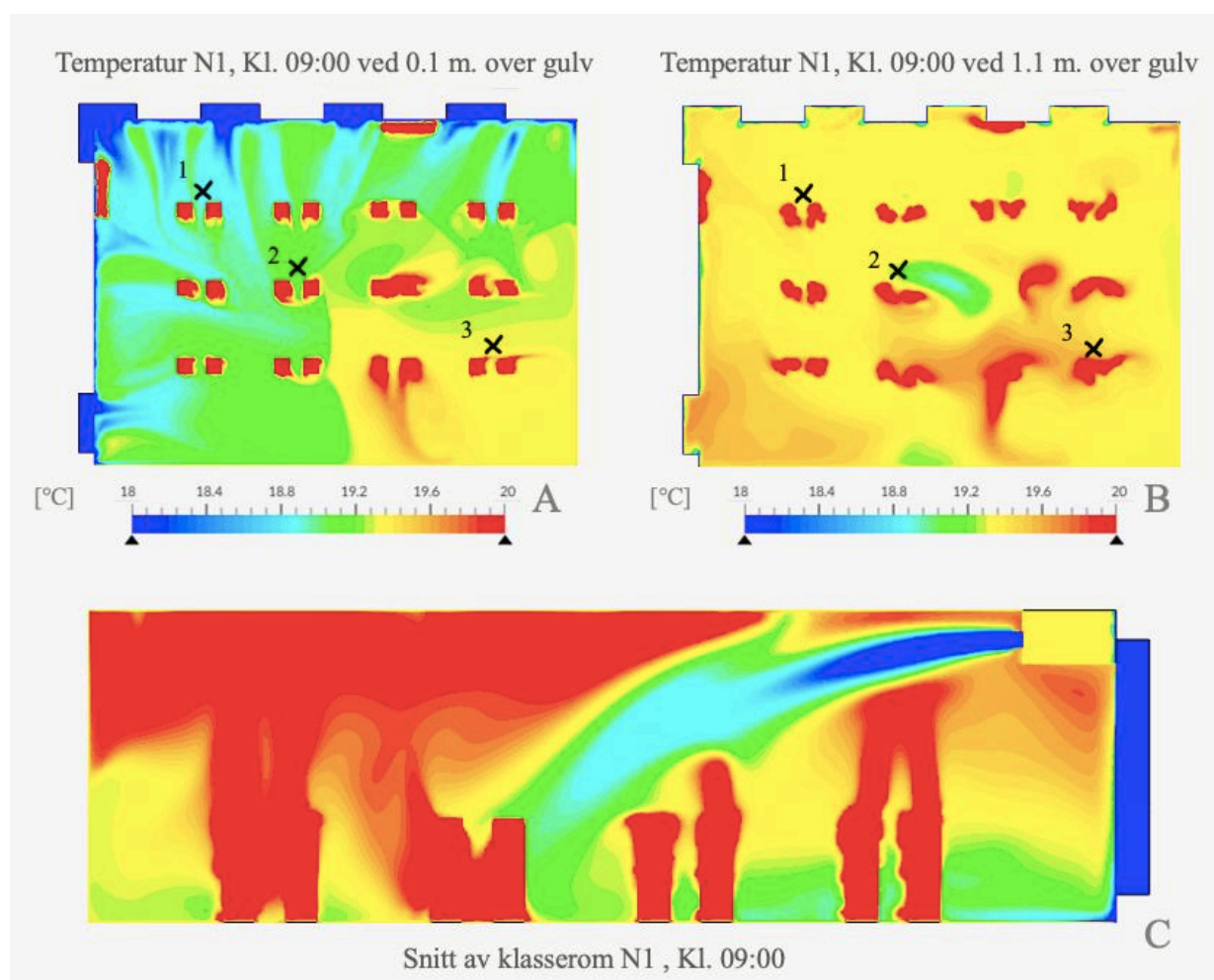
Figur 4-21 Simulering av PPD i rom 1S om sommeren i Simscale

Vertikal variasjon i termisk komfort

Ved å undersøke trekk på vinterstid er det hentet ut lufttemperatur ved 0.1 m og 1.1 m, slik som definert i NS-EN 16798-1:2019. Verdier er hentet ut fra markeringer i figur 4-22, og oppført i tabell 4-3. Et punkt med mulig påvirkning fra vinduer (1), et punkt med liten påvirkning, dypt i rommet (3) og et punkt rundt den kalde sonen (2) er valgt ut. Figur C er tatt med for å vise hvor lufta fra ventilasjonsenheten faller ned på vinterstid. Vertikal variasjon er kun undersøkt i rom 1N på vinterstid om morgenen, ettersom dette tidspunktet mest sannsynlig vil ha størst vertikal variasjon grunnet stor temperaturforskjell mellom ute og inne.

Tabell 4-3 Simulert vertikal temperaturdifferanse i rom 1N på vinterstid kl 09

Vertikal temperaturdifferanse i rom 1N om vinteren klokken 09			
Høyde over gulv	Målepunkt A	Målepunkt B	Målepunkt C
0.1 m	18.8	19.0	19.3
1.1 m	19.4	19.2	19.6
Differanse	0.6	0.2	0.3



Figur 4-22 Simulert vertikal temperaturdifferanse i rom 1N på vinterstid kl. 09

4.3 Vurdering av termisk komfort og energibruk gjennom simulering i SIMIEN

Simien er benyttet for å få et mer helhetlig inntrykk av den termiske komforten gjennom året, og for muligheten til å studere andre faktorer enn innvendig lufttemperatur og relativ luftfuktighet. Ved å utføre ulike tiltak har påvirkning på komfort blitt undersøkt.

4.3.1 Simulering av termisk komfort og innemiljøkvalitet

Fra tabell 4-1 vet vi at rom N1 har størst utfordringer med termisk komfort på vinteren og rom S2 har størst utfordringer på sommeren. Det er derfor utført vintersimulering i SIMIEN for rom 1N og sommersimulering for rom 2S. Inndata for simuleringene er presentert i kapittel 3.3.1.

Validering mot Omnisense-målinger

Validering av simulering er gjort gjennom kontroll mot målinger fra Omnisense-sensorene. Med validering menes det at målinger fra Omnisense, eller værstasjon skal være relativt like simulerte verdier.

Tabell 4-4 Validering av komfortsimulering for rom 1N i SIMIEN

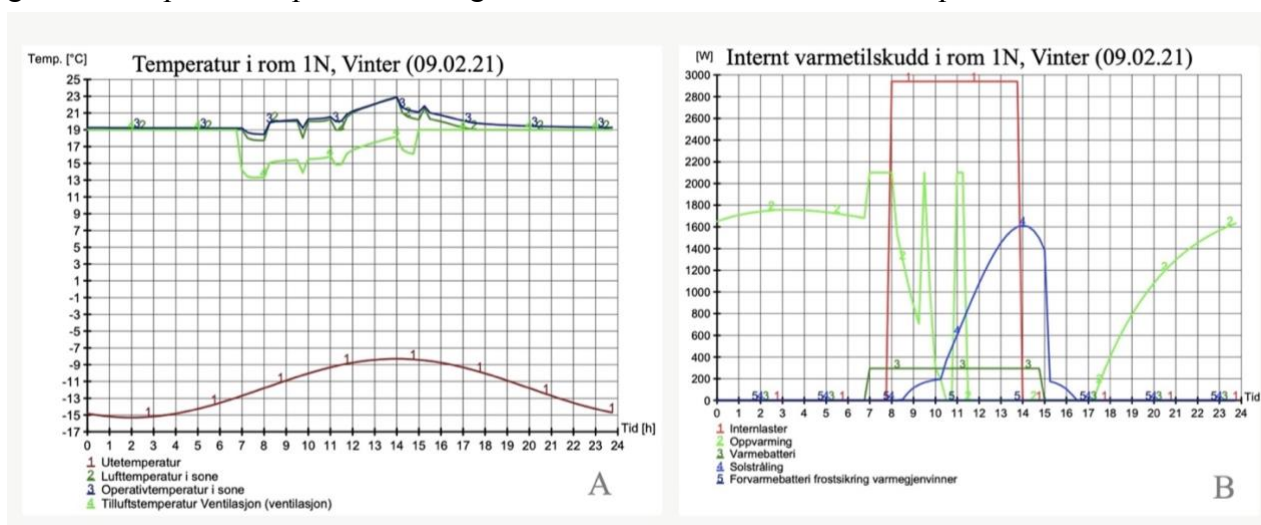
Tid	Utetemperatur 09.02.21 Flisa II	Utetemperatur 09.02.21 SIMIEN	Innetemperatur N1 09.02.21 Omnisense	Innetemperatur N1 09.02.21 SIMIEN
08	-14.7	-12	19.7	19
09	-14.3	-11	19.3	20
10	-12.5	-10	19.9	20.2
11	-11.0	-9.1	21.0	20.5
12	-10.2	-8.9	20.7	21
13	-8.3	-8.5	21.7	22
14	-7.7	-8	21.8	23

Tabell 4-5 Validering av komfortsimulering for rom 2S i SIMIEN

	Utetemperatur 01.06.21 Flisa II	Utetemperatur 01.06.21 SIMIEN	Innetemperatur S2 01.06.21 Omnisense	Innetemperatur S2 01.06.21 SIMIEN
08	17.5	18.1	23,82	22.5
09	19.1	19.8	24,1	24
10	21.2	21	24,66	25
11	21.9	22	24,62	25.8
12	22.6	23	26,36	26.2
13	23.6	23.5	26,5	27
14	23.6	24.0	27,22	28

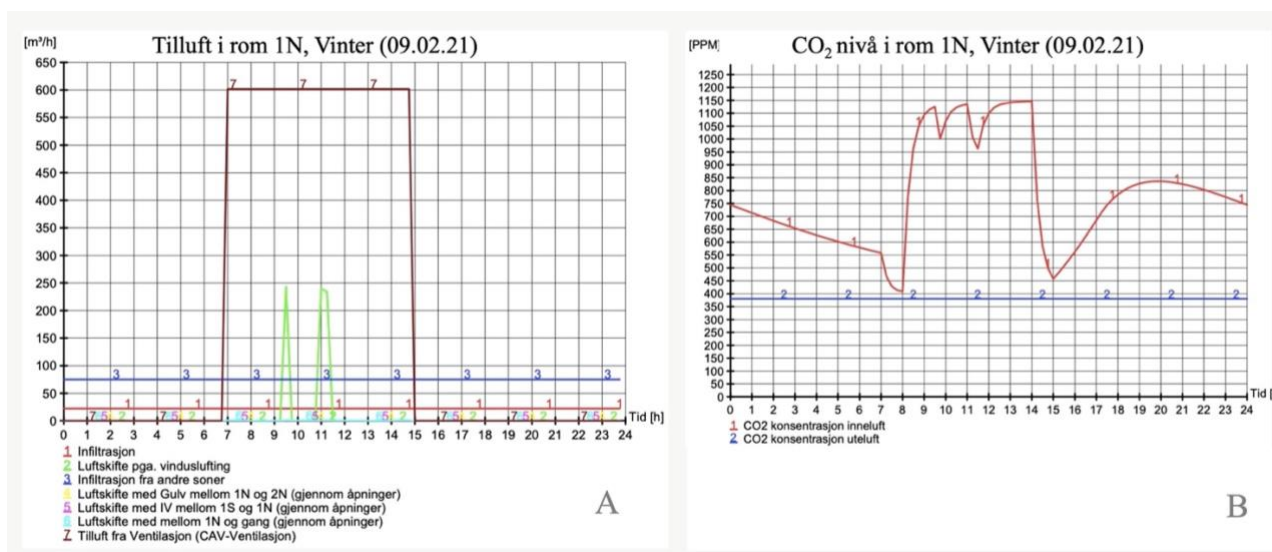
Vintersimulering (09.02.21) i SIMIEN, rom 1N

Figur 4-23 A viser variasjon i lufttemperatur gjennom døgnet, mens figur B viser variasjon i internt varmetilskudd. De ulike varmekildene består av varmetilskudd fra elever, solvarme, varme fra radiatorer og fra ventilasjonsanlegget. Varmen fra ventilasjonsaggregat er konstant hele dagen, det samme gjelder varmen fra elevene. Varmetilskudd fra sola stiger utover dagen, og når maks rundt klokken 14. Radiatorenes varmetilskudd er høyest ved lavest innetemperatur, og synker derfor ut over dagen ettersom rommet varmes opp. Vinduslufting fører til hopp i varmetilskuddet fra radiatorer. Figur A viser også hvor begrenset varmegjenvinneren til ventilasjonsenheten er på vinteren. Ved starten av dagen har tilluften en temperatur på rundt 13 grader. Temperaturen på tilluften stiger sammen med den økende utetemperaturen.



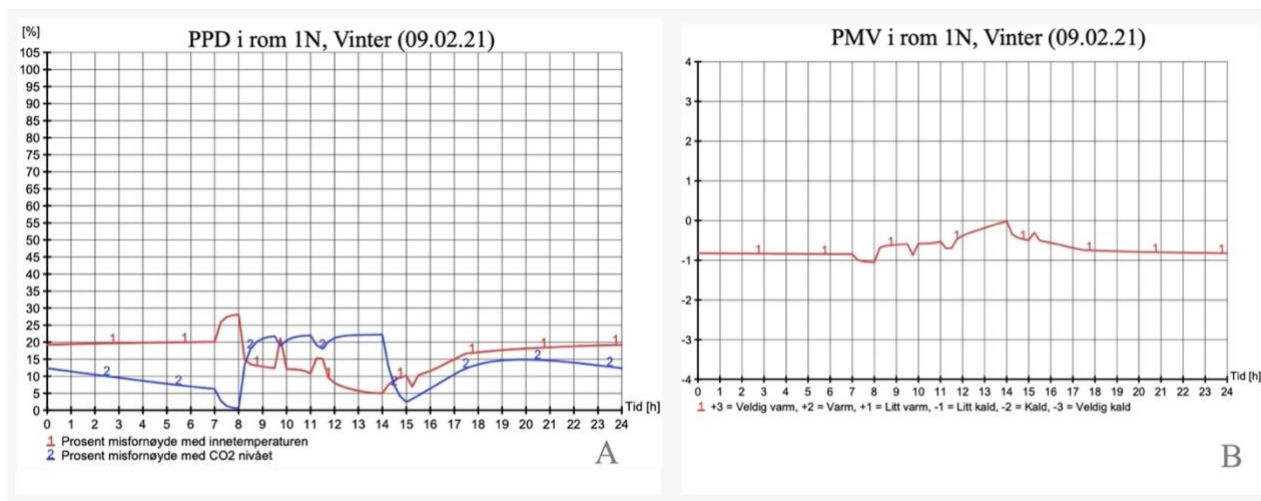
Figur 4-23 Simulert lufttemperatur og internt varmetilskudd i rom 1N, vinterstid

Figur 4-24 A viser lufttilførselen, og B viser CO₂ konsentrasjonen i rommet. Fra figur B ser vi at CO₂ konsentrasjonen er konstant over 1000 ppm, men synker i pauser hvor det vindusluftes.



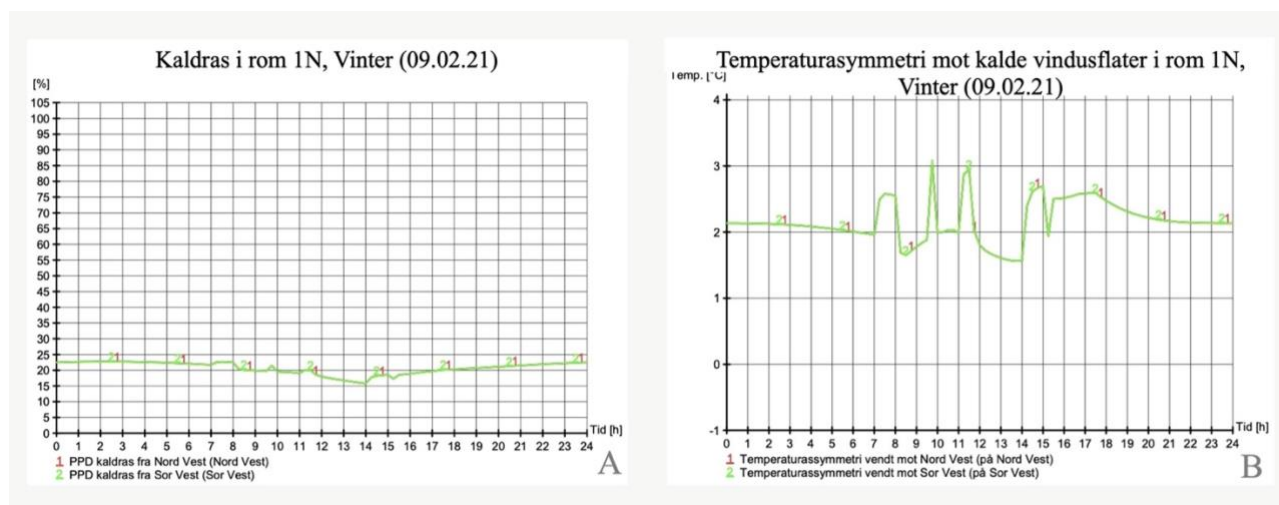
Figur 4-24 Simulert tilluft og CO₂ nivå i rom 1N, vinterstid

Figur 4-25 A og B viser PPD og PMV. Skoledagen starter med en PMV på omtrent -1, og avsluttes rundt 0, ved termisk nøytralt nivå. Figur E viser at 30 % er misfornøyde med innvendig lufttemperatur ved starten av dagen, og at dette antallet synker mot slutten av skoledagen. Noen hopp i PPD foretreffer i pausene hvor det vindusluftes. Andel misfornøyde med CO₂ konsentrasjonen er rundt 20 %.



Figur 4-25 Simulert PPD og PMV i rom 1N, vinterstid

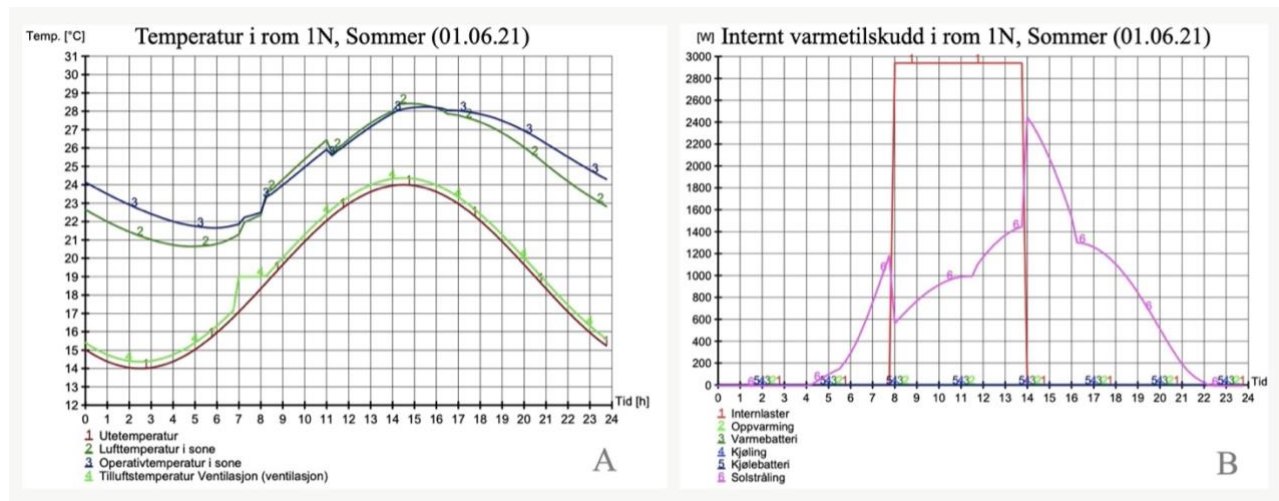
Figur 4-26 viser verdier for kaldras og temperatursymmetri mot vindusflater. Figur A viser at ved begynnelsen av dagen er 20% i gruppen misfornøyde med trekk fra kaldras, mens på slutten av dagen har andelen blitt redusert til 15%. Temperatursymmetrien i rommet påvirkes av vindusluftingen, og har ellers en synkende trend utover dagen. I henhold til tabell 2-9 er strålingsassymmetri for kald vegg under 10 grader temperaturforskjell innenfor kategori IEQ_I. En PPD på 25% for kaldras er langt over akseptabelt nivå, og ligger utenfor kategori IEQ_{III}, som er kategorien med lavest angitte forventningsnivå for lokal termisk diskomfort.



Figur 4-26 Simulert kaldras og temperatursymmetri i rom 1N, vinterstid

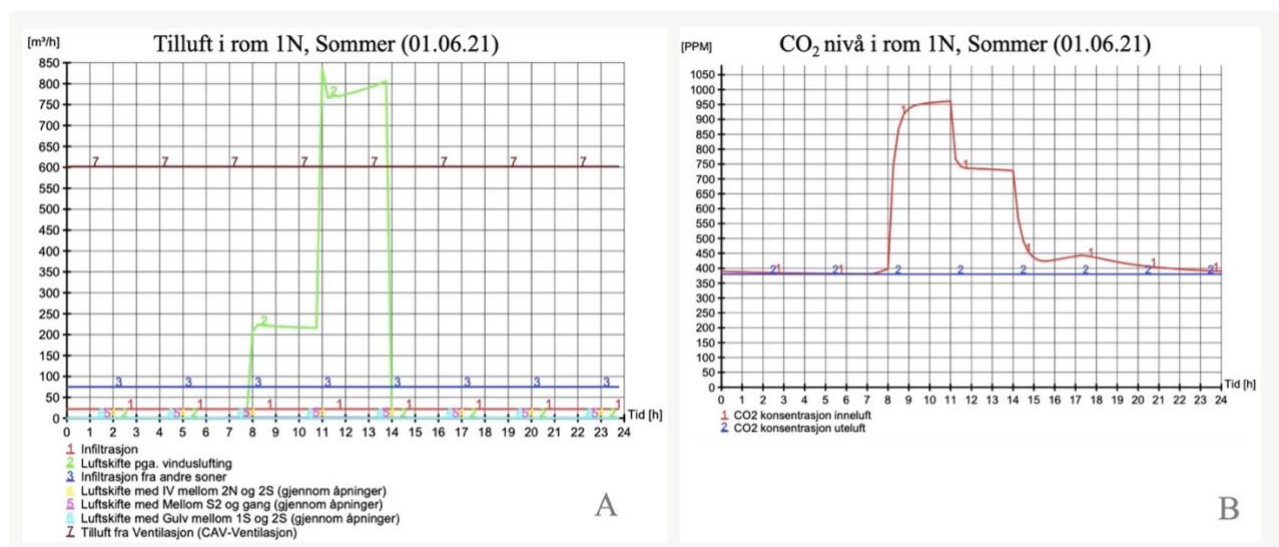
Sommersimulering (01.06.21) i SIMIEN, rom 2S

Figur 4-27 A viser variasjon i lufttemperatur gjennom døgnet, mens figur B viser variasjon i internt varmetilskudd. Lufttemperaturen innendørs følger samme kurve som lufttemperaturen utendørs. Maksimal innendørs lufttemperatur inntreffer klokken 14, og er 28 grader. I figur B ser vi at det bare er bidrag fra to varmekilder; mennesker og stråling fra sola. Vinduene har integrert skjerming som hindrer store deler av det potensielle varmetilskuddet fra sola.



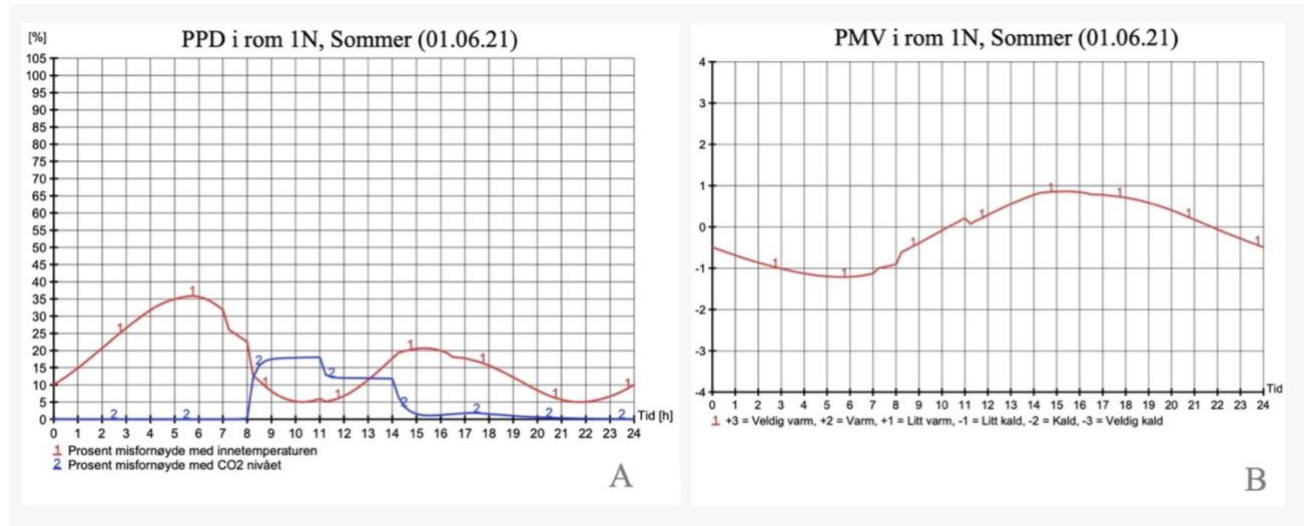
Figur 4-27 Simulert lufttemperatur og internt varmetilskudd i rom 2S, sommerstid

Figur 4-28 A viser lufttilførselen, og B viser CO₂ konsentrasjonen i rommet. Fra figur B ser vi at CO₂ konsentrasjonen er under 1000 ppm, og synker et stort hakk etter klokken 11, hvor det er lagt inn ekstra vinduslufting gjennom verandadør i tillegg til luftingen gjennom de bunnhengslede vinduene. Kurven for luftskifte grunnet vinduslufting øker et tilsvarende hakk klokken 11.



Figur 4-28 Simulert tilluft og CO₂ nivå i rom 1N, vinterstid

Figur 4-29 A og B viser PPD og PMV. PMV svinger fra -1 om morgenen til +1 om ettermiddagen. Klokken 10 er det termisk nøytralt. Fra 4-19 A ser vi at ca. 17 % er misfornøyde med CO₂ konsentrasjonen i den første halvdelen av dagen, og at andelen misfornøyde synker til 12 % ved økt lufting etter klokken 11.



Figur 4-29 Simulert PPD og PMV i rom

4.3.2 Simuleringer med tiltak for å øke termisk komfort om vinteren

Gjennom vintersimuleringen har følgende problemområder vist seg gjeldende:

- 1) For høyt CO₂ nivå
- 2) Trekk
- 3) For kald lufttemperatur innendørs på morgenen

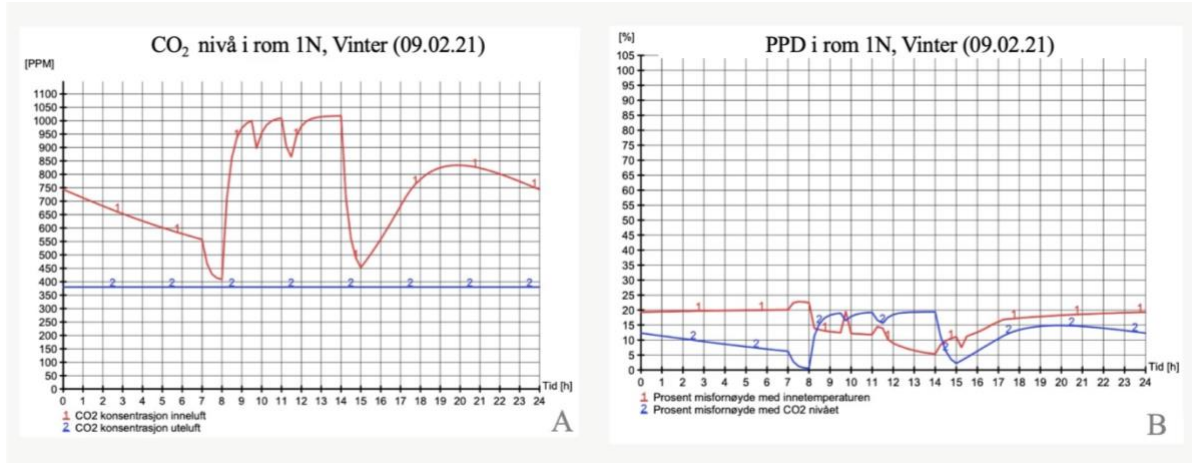
Tiltak for å forbedre den termiske komforten er oppgitt i tabell 4-4.

Tabell 4-6 Tiltaksoversikt, vinter

Problemområde	Tiltak	Kommentar
1) Høyt CO ₂ nivå	- bytte ut ventilasjonsenhet med en enhet som kan ha større luftmengde ved mindre støy	Vurdert som best alternativ.
	- redusere personbelastning	Se simulering på neste side.
	- øke vinduslufting	Vil øke energibehov til oppvarming.
2) Trekk	-	-
3) Lav lufttemperatur	-bytte ventilasjonsenhet med enhet som har større varmebatteri-kapasitet	-
	-Øke settemperatur på radiatorer -Økt bekledding	Se simulering på neste side.

Redusert personbelastning

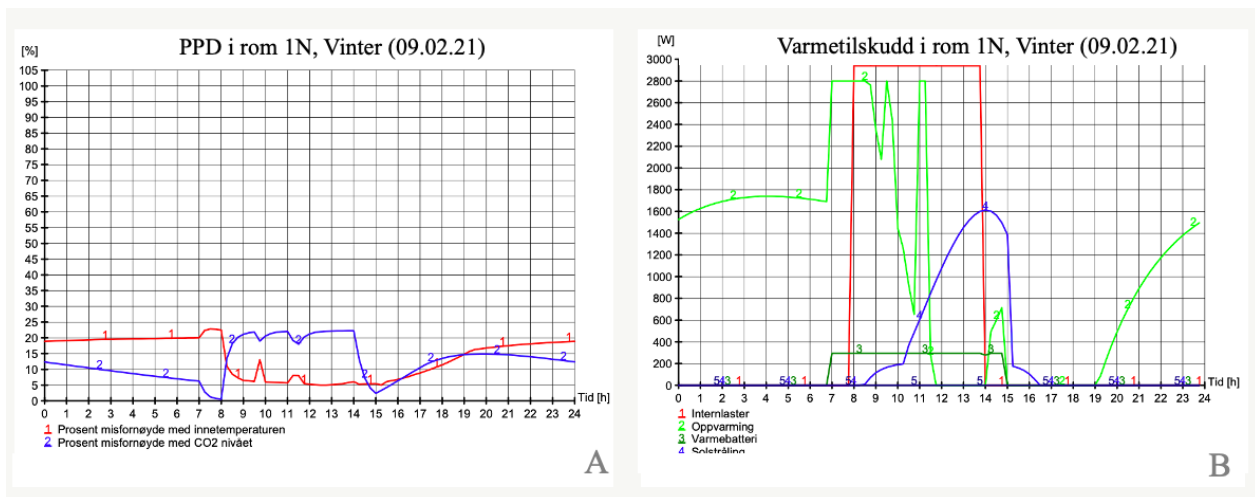
Figur 4-30 A viser at ved å redusere antall personer fra 25 til 20 personer vil CO₂ konsentrasjonen reduseres fra 1150 til rundt 1000 ppm. Figur B viser at dette tiltaket vil ha minimalt å si for andel misfornøyde i rommet, som reduseres fra 22 % ved 1150 ppm til 20%.



Figur 4-30 Simulert effekt av redusert personbelastning i Rom 1N på vinteren

Økt sette temperatur på radiatorer fra 20 grader til 22

Figur 4-31 A viser at ved å utføre dette tiltaket vil andel misfornøyde med innvendig lufttemperatur reduseres fra 22% til 5 % innen den første timen. Denne endringen tilsvarer et økt energiforbruk på 2 % for bygningen. Figur B viser den økte effekten til radiatorene.



Figur 4-31 Simulert effekt på termisk komfort av økt sette temperatur på radiatorer

4.3.3 Tiltak for å øke termisk komfort om sommeren

På sommeren er dårlig termisk komfort og ubehag i form av høye lufttemperaturer gjeldende spesielt mot slutten av dagen. Vinduer mot sør-øst har integrert solskjerming, samt innvendige persiener. Videre tiltak for å redusere varmetilskudd fra solstråling er derfor ikke undersøkt nærmere. Aktuelle tiltak for å forbedre situasjonen vil i større grad være rettet til bruken av rommene som ved for eksempel økt vinduslufting, eller at skoledagen starter og slutter en time tidligere på sommeren.

4.3.4 Simuleringer av energibruk

Simulering av energibruken til bygningen er gjort for å se effekten eventuelle tiltak gjør for energiregnskapet. Figur 4-32 og 4-33 viser sentrale inndata for simulering i SIMIEN.

Inndata klima	
Beskrivelse	Verdi
Klimasted	Elverum
Breddegrad	60° 54'
Lengdegrad	11° 36'
Tidssone	GMT + 1
Årsmiddeltemperatur	4,1 °C
Midlere solstråling horisontal flate	96 W/m ²
Midlere vindhastighet	3,7 m/s

Figur 4-32 Sentrale inndata i SIMIEN klima

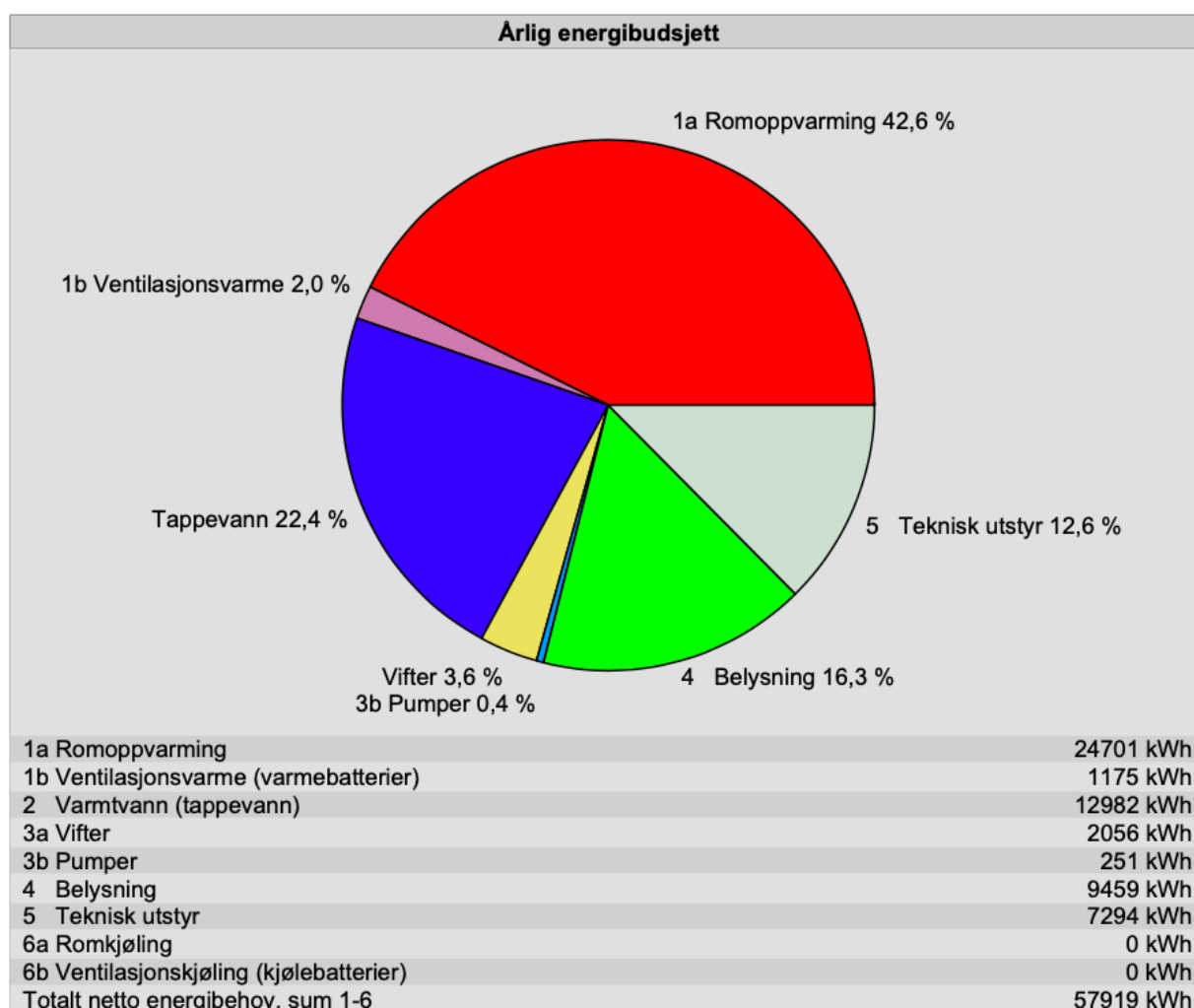
Dokumentasjon av sentrale inndata (1)		
Beskrivelse	Verdi	Dokumentasjon
Areal yttervegger [m ²]:	428	
Areal tak [m ²]:	267	
Areal gulv [m ²]:	269	
Areal vinduer og ytterdører [m ²]:	98	
Oppvarmet bruksareal (BRA) [m ²]:	544	
Oppvarmet luftvolum [m ³]:	1632	
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0,34	
U-verdi tak [W/m ² K]	0,12	
U-verdi gulv [W/m ² K]	0,15	
U-verdi vinduer og ytterdører [W/m ² K]	1,12	
Areal vinduer og dører delt på bruksareal [%]	18,0	
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]:	0,05	
Normalisert varmekapasitet [Wh/m ² K]	40	
Lekkasjetall (n50) [1/h]:	1,50	
Temperaturvirkningsgr. varmegjenvinner [%]:	67	

Figur 4-33 Sentrale inndata i SIMIEN

Figur 4-34 og 4-35 viser Energibudsjett for bygningen. Ca. 45 % av forbruket går til oppvarming. Simulert totalt netto energibehov er mindre enn reelt behov. Fra oversikt i tabell 3-8 vet vi at 55.4 kWh/m² går til radiatorvarme i virkeligheten. Dette er 10 kWh/m² mer enn simulert. Poster for energiforbruk til tappevann, teknisk utstyr og belysning er gitt etter input av standardverdier fra NS-3031, og dette kan derfor avvike fra reel bruk.

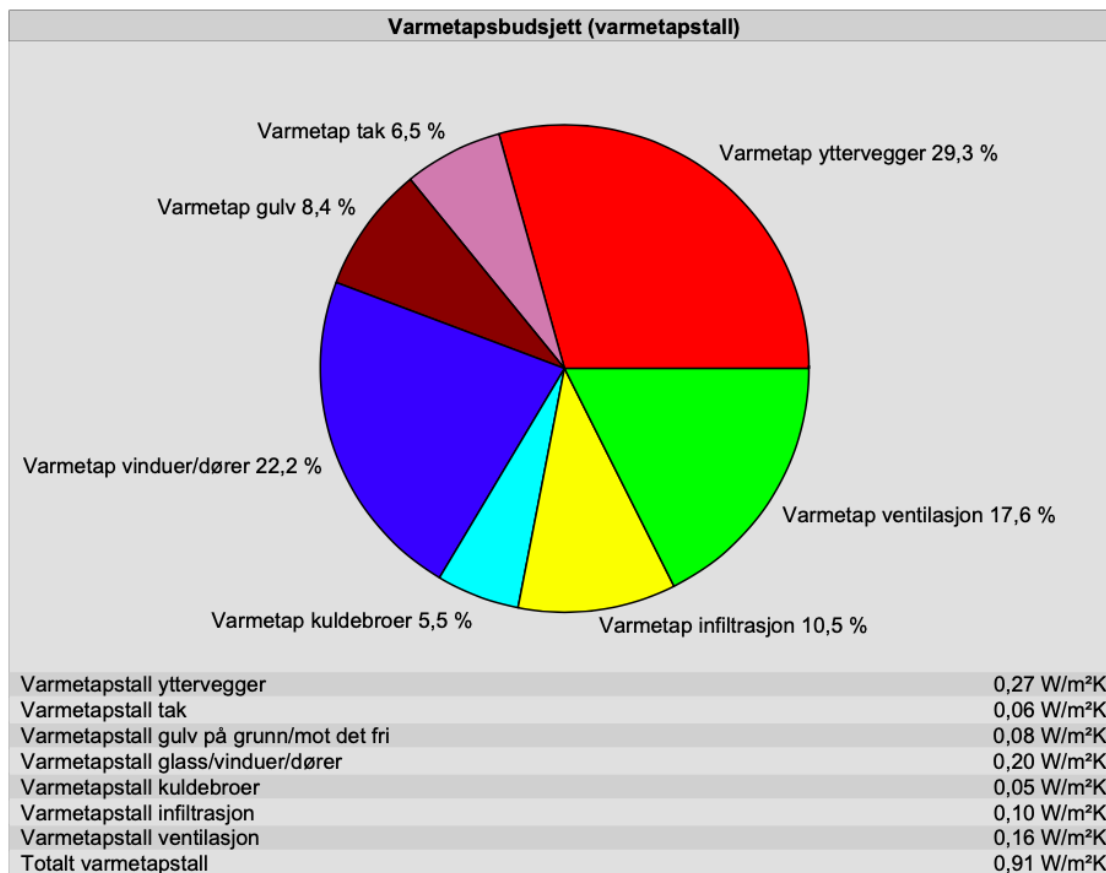
Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	24701 kWh	45,4 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	1175 kWh	2,2 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	12982 kWh	23,9 kWh/m ²
3a Vifter	2056 kWh	3,8 kWh/m ²
3b Pumper	251 kWh	0,5 kWh/m ²
4 Belysning	9459 kWh	17,4 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	7294 kWh	13,4 kWh/m ²
6a Romkjøling	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	57919 kWh	106,5 kWh/m²

Figur 4-34 Simulert Energibudsjett



Figur 4-35 Årlig energibudsjett

Varmetapsbudsjett for bygningen er vist i figur 4-36. De faktorene som bidrar mest til varmetap er yttervegg, vinduer/dører og ventilasjon.



Figur 4-36 Varmetapsbudsjett

5 Diskusjon

Diskusjonen er strukturert på samme måte som resultatdelen, med vurdering av sensormålinger først, deretter simulering av termisk komfort i Simscale, og til sist simulering av termisk komfort og energibruk i SIMIEN.

5.1 Vurdering av termisk komfort gjennom sensormålinger

I teoridelen ble to metoder for klassifisering presentert; vurdering etter forskrift for miljørettet helsevern og vurdering etter SN-CEN/TR 16798-2:2019. I dette kapitlet refereres det heretter til vurdering etter forskrift for miljørettet som *forskriften*, og SN-CEN/TR 16798-2:2019 som *standarden*.

Vurdering etter forskrift

Inndelt etter sesong, kommer det frem at det er verst termisk komfort på sommeren, med hele 32% av målingene utenfor akseptabelt nivå. Det er viktig å påpeke at disse 32% inneholder både for lave og for høye verdier. Fra teoridelen (Wargoeki et al., 2019) vet vi at når temperaturen på innelufta er rundt 21 grader er forholdene optimale med tanke på kognitivt arbeid. At denne nedre temperaturgrensen er satt er nok mer i sammenheng med at bekledningen på sommerstid vil være mindre enn på vinterstid, og gitt lett bekledning så vil denne temperaturen føles ubehagelig kjølig.

Andelen målinger over 26 grader utgjør 20 % på sommeren, som utgjør ca. 22 timer. Dette er under hva Byggforsk anbefaler at skolebygninger burde ligge under (maks 25). Det må dog nevnes at tidsrom i bruk er en time mindre for klasserommene i denne bygningen, enn hva som er vanlig brukstid for en skole (til klokken 15), og at hvis brukstiden hadde blitt utvidet med en time så hadde andelen målinger over 26 grader vært større.

Vurdering etter standarden

Istedenfor nedre og øvre grenseverdier for hver sesong deler standarden inn i klasser ut ifra forventningsnivå. Fra kapittel 2.1.4 vet vi at kategori IEQ_{IV} burde forekomme i et svært kort tidsrom av året, og i rom hvor opphold er svært begrenset. Sommerdatasettet består av 14 dager, og dette innebærer at i løpet av en skoleuke så vil 3-4 timer av uken oppleves svært ubehagelig med tanke på termisk komfort. Kombinert utgjør kategori IEQ_{III} og IEQ_{IV} 35 % av tiden om sommeren, noe som tilsvarer i underkant av to hele dager hver uke. Etter beskrivelsen av kategori IEQ_{III} vet vi at det er risiko for redusert prestasjon, og dermed også læring i disse dagene.

Ved inndeling etter rom utpeker rom 1N seg som rommet med størst utfordringer. At

dette rommet er i 1. etasje mot nord - vest anses å være mye av årsaken. På sommerstid har rom 2S størst utfordringer. At rommet er i 2. etasje mot Sør – Øst anses å være mye av årsaken.

Sammenligning av metoder

Ved sammenligning av metode etter forskrift og etter standarden fremgår ulike fordeler og ulemper ved metodene. Standarden har kategorier hvor målinger innenfor en enkelt kategori både kan være for lave eller for høye. Dette kan føre til misforståelser, og at man kan anta at et rom med stort spenn i temperaturer, både høye og lave, istedenfor bare har en stor andel av tiden i den ene eller andre retningen. Dette gjør det vanskelig å kartlegge problemer.

At standarden angir ulike kategorier, gjør det mulig å se kvaliteten til inn klimaet på en mer detaljert måte. Standarden har også en beskrivelse av kategoriene med lavere forventingsnivå. Forskriften opererer bare med akseptabelt og uakseptabelt. Det store spennet i forskriften samsvarer med kravene til kategori IEQ_{II}, slik at om man legger sammen IEQ_I og IEQ_{II} så oppnår man samme resultat. Som en kritikk til forskriften er det ikke angitt noen sesonggrenser, og i denne oppgaven er det derfor brukt sesonggrenser som definert i standarden.

Variasjon mellom rom

Klasserom i 2. etasje mot sør har høyes median, mens rommet mot nord i 1. etasje har lavest. Variasjonen mellom rommene anses som naturlig variasjon gitt himmelretning og etasjehøyde.

Variasjon innad i rommene

At den termiske komforten varierer innad i rommet kan komme av flere grunner, hvor asymmetrisk stråling og trekk vil være de viktigste bidragsyterne. I rommene vil både en vertikal og horisontal variasjon finne sted, men ettersom alle sensorene er plassert i pulthøyde er det bare variasjon i dette planet som er mulig å kommentere ut ifra sensormålinger. Variasjonen er minst i klasserommene på vinteren og størst på sommeren. At det vindusluftes mer på sommeren anses som en stor del av årsaken.

Variasjon mellom behandlinger

Svært lite skiller målinger fra rom med lakkerte overflater og målinger fra rom med ubehandlede overflater. Forskjellen mellom minimum, median og maksimumsverdier er ubetydelig.

Innendørs relativ luftfuktighet

Om vinteren er det svært lav relativ luftfuktighet i rommene. At det frarådes bruk av luftfuktere (Sintef Byggforsk, 2005b) gjør dette problemet utfordrende å løse. Selv med lavt luftskifte er målt relativ luftfuktighet svært lav. 12 % av tiden under anbefalt krav utgjør ca. to uker av måleperioden.

5.2 Simuleringer

To ulike simuleringstøytøy er brukt; SIMSCALE og SIMIEN. Begge verktøyene dokumenterer termisk komfort, men på ulikt vis. I SIMSCALE er det større mulighet for utforskning av lokal termisk diskomfort, samt variasjon i termisk komfort innad i rommet gjennom visualisering av plan med ulik høyde. I SIMIEN er dette kartlagt gjennom strålingsasymmetri mot kalde flater og kaldras.

Simulering av luftstrøm i SIMSCALE

Simulering på vinterstid viser stor variasjon i planet om morgenen og nesten ingen variasjon i planet på ettermiddagen. Variasjonen i planet om morgenen er rundt 0.7 grader. En kald sone dannes der ventilasjonsluften faller ned. Hvor langt ventilasjonsluften føres langstaket er avhengig av temperaturdifferansen mellom innblåst luft og romluft. Ved høy differanse utblir Coanda-effekten, og luften vil falle ned så fort at den ikke får tid til å varmes opp nok. Den lokale termiske komforten i klasserommene påvirkes derfor i stor grad av ventilasjonsstrategi.

På sommeren er variasjonen i planet omtrent den samme om morgenen som på ettermiddagen, og varierer med ca. 2 grader. Hvordan variasjonen ser ut på sommerstid vil påvirkes av hvordan det vindusluftes. Simulering på sommerstid viser bare lufting gjennom verandadør.

For å få frem variasjonen i rommet må temperaturgrensene stilles nærmere. Grenser er valgt for å visuelt få frem mest mulig variasjon, innenfor relativt naturlige grenser. Dette innebærer at de målte ytterpunktene av skalaen i realiteten kan være høyere/lavere. Sammenlignes variasjonen fra SIMSCALE mot variasjon beskrevet i kapittel 4.1.4 så stemmer resultatene overens. På vinteren er det ca. 0.5 grader variasjon innad blant sensorene, foruten avvikene på slutten av dagen. På sommeren viser sensormålingene større variasjon, og ofte over en grads forskjell.

Simulering av termisk komfort og energibruk SIMIEN

Fra vintersimulering av termisk komfort i SIMIEN kommer det frem tre problemområder; dårlig termisk komfort om morgenen, trekk og for høyt CO₂ nivå i innelufta. At CO₂ konsentrasjonen ligger over anbefalt nivå mesteparten av dagen kommer av lav luftmengde og

liten mulighet for vinduslufting grunnet kald utetemperatur. Med jevn vinduslufting gjennom hele dagen har sommerstid CO₂ konsentrasjoner i henhold til anbefalt nivå. Beste tiltak for å løse problemet på vinterstid vil være å bytte ut enheten med en bedre lydisolert enhet og som har større varmebatteri. Dette tiltaket vil forbedre flere av problemene ved inneklimate.

Trekk i form av kaldras er utfordrende å løse. Årsaken bak kaldras-verdiene er knyttet til mengden vindusoverflate. Vanligvis forbedres kaldras ved plassering av radiatorer under vindu, men ved så mange vinduer, med en så lav brystningshøyde vil dette være uaktuelt.

Simulert energibruk til bygningen er lavere enn reell energibruk. Mye av usikkerheten til simuleringen er knyttet til manglende informasjon, og det er derfor benyttet standardverdier for de ulike varmetilskuddene, som kan resultere i avvik.

Sammenligning av resultat mellom simuleringer

Simuleringer på vinterstid er direkte sammenlignbare ettersom de ser på samme dato og rom. For sommersimuleringen er det valgt ulike rom. Mest optimalt skulle rommet med størst utfordringer i form av høye temperaturer vært valgt, men i SIMSCALE ble S1 valgt da dette utelukket simulert varmestrøm fra rom i 1. etasje til 2. etasje.

Ettersom begge simuleringer er validert mot temperaturmålinger vil gjennomsnittlig temperatur, PMV og PPD fra SIMSCALE svare greit overens med simulering i SIMIEN. Til eksempel på morgenen om vinteren viser SIMIEN 27 % misfornøyde i gruppen. I SIMSCALE varierer PPD mellom 12 og 31% i oppholdssonen. Ved å se på andelen av isotermene kan et gjennomsnitt anslås til å være rundt samme området som i SIMIEN.

Om simulering som verktøy, og validering av simuleringer

For at simuleringer skal ha noen reell nytte må de valideres mot reell situasjon. Datasett fra Omnisense er benyttet til dette, hvor innendørs lufttemperatur i simuleringer sammenlignes mot lufttemperatur fra sensormålinger. For å minske omfanget av studien valideres et utvalg data. I denne oppgaven ble det valgt en kald/varm dag, innenfor tidsrom i bruk. Hadde det blitt utført validering mot flere dager, og over døgn istedenfor bare brukstid hadde muligens simuleringene vært enda mer treffsikre.

Noen sentrale inputdata er ganske forskjellige i de to simuleringene. Spesielt g-faktor, solstråling og temperaturvirkningsgrad til varmegjenvinner i ventilasjonsenheten. Ved studier som dette hvor man kartlegger faktiske forhold, kan en utfordring være mangelfull informasjon om produkter. Ved å teste flere sannsynlige muligheter kan feil inputdata lokaliseres, og justeres. Det er likevel slik at mange kombinasjoner kan komme ut med samme resultat, og på slikt vis være «like» validert. At både SIMIEN og SIMSCALE valideres gjør at begge inputvarianter kan være mulig. SIMIEN har kanskje en mer realistisk temperaturvirkningsgrad, mens SIMSCALE har en mer realistisk solstråling og g-faktor. «Validerte» løsninger forteller oss uansett mye om den innvendige termiske komforten, og kan benyttes for å illustrere reelle

forhold selv om inputvariablene nødvendigvis ikke er 100% korrekte.

At solstrålingen er mye høyere i SIMIEN enn verdier fra Byggforsks tabeller, gjør også standardverdier for solskjerming i SIMIEN mindre sannsynlig til å være korrekte. Grunnet god g-faktor for innvendige persienner ble tiltak om utvendig solskjerming forkastet. Om input fra SIMSCALE stemmer bedre med realiteten, vil solskjerming på Sør-vestvendt fasade være en god løsning.

Om treverks påvirkning på energibruk:

Bygninger med treverk som konstruksjonsmateriale er ansett som lette konstruksjoner, og vil derfor typisk ha større problemer med effekttopper (for høye eller for lave temperaturer) sammenlignet med tyngre konstruksjoner. En massivtrebygning vil i prinsippet anses som tyngre enn en bygning i bindingsverk, men lettere enn bygninger i betong, og vil derfor ha et spenn et sted imellom. Konstruksjonen på Hanstad har dog 3 ganger så tykke massivtreelementer enn hva vanlige skoler i massivtre har, og bygningen vil derfor ligge et sted mellom lett og tung bygning.

Når det kommer til bidrag fra faseforandring og latent varme er denne egenskapen avhengig av fuktproduksjon. I figur 4-13 ser vi at det er liten variasjon i RF gjennomdagen på vinterstid, og man kan derfor anta at energibidrag fra fuktopptak i treverk vil være liten. Årsak til liten variasjon kan muligens være grunnet ventilasjon, og at fuktigheten føres ut med avtrekkslufta før fuktbufring finner sted.

Avvik og usikkerhetsmomenter

I denne studien er det flere usikkerhetsmomenter som gjør det vanskelig å trekke konklusjoner. Studien har ingen gjentakelse, og dataene kan derfor ikke brukes til å konkludere på statistisk grunnlag. Dataene sier med andre ord bare noe om forholdene i denne spesifikke bygningen, og kan ikke brukes til å danne generelle konklusjoner.

Faktorer som videre vanskeliggjør sammenligning av termisk komfort i de ulike rommene er at rommene er plassert i forskjellige etasjer og med ulik himmelretning, og derav ulik solinnstråling.

Videre arbeid

Denne oppgaven hadde vært mer komplett om sensormålinger var kombinert med spørreundersøkelse hos brukere.

6 Konklusjon

Målet for denne oppgaven vår å svare på følgende problemstilling:

Hvordan påvirkes termisk komfort og energibruk i en skole i uisolert massivtre med desentral ventilasjon og ulike typer overflatebehandling?

For å kunne svare på dette ble fire ulike forskningsspørsmål undersøkt.

I Hvordan påvirker desentral ventilasjon den termiske komforten lokalt i et klasserom?

På Hanstad er den desentrale ventilasjonsløsningen ugunstig, mye grunnet ventilasjonsenhetens begrensninger og nordisk klima. En innstilling med lav luftmengde i forhold til personbelastning er i bruk ettersom høyere luftmengder gir problemer med støy. Dette gir dårlig kvalitet på innelufta og økt behov for å supplere med lufting gjennom vindu. At systemet ikke kan stille en laveste temperaturgrense for innblåsingstemperatur gjør løsningen utfordrende på vinterstid. Temperaturdifferansen mellom innblåst luft og romluften blir så høy at Coanda-effekten ikke finner sted, resulterende i at luften faller ned for tidlig og skaper en kald sone i senter av rommet. En kombinert ventilasjonsløsning hvor vinduslufting er en del av strategien kan fungere bra på sommerstid, men på vinterstid må brukerne gjøre en avveining av god luftkvalitet versus komfortabel lufttemperatur. Optimalt skulle man sluppet dette valget.

II Hvordan er energibruken og den termiske komforten til en skole i uisolert massivtre med desentral ventilasjon?

Massivtrebygningen på Hanstad bruker i overkant av hva som er energirammekrav i TEK10, og enda mer sammenlignet med kravene i TEK17. De største varmetapspostene er tilknyttet ytterveggkonstruksjon, varmetap gjennom vinduer og gjennom ventilasjon. Varmetap gjennom yttervegg er grunnet lav U-verdi grunnet manglende isolasjon, og varmetap tilknyttet ventilasjonsstrategien er mye grunnet stort behov for vinduslufting.

Bygningen har ulike utfordringer med tanke på termisk komfort om vinteren enn om sommeren. På vinterstid er utfordringen dårlig kvalitet på innelufta, og ubehag tilknyttet lav innetemperatur. Årsaken er mye grunnet begrensninger til ventilasjonsenhet. Høy CO₂ konsentrasjon er grunnet lav luftmengde og liten mulighet for vinduslufting grunnet kald utetemperatur. På sommerstid er utfordringen for høye innetemperatur grunnet mye vindusareal og høyt varmetilskudd fra solinnstråling, i tillegg til bygningens lave termisk masse.

III Hvordan er den termiske komforten i klasserommene med diffusjonstett overflatebehandling sammenlignet med klasserommene med ubehandlede treoverflater?

Termisk komfort påvirkes av svært mange faktorer. I denne oppgaven er bidrag fra fuktbufring vanskelig å kommenter ettersom rommene har ulikt varmetilskudd fra solinnstråling og ulik g-

faktor på vinduer, samt at rommene har ulikt varmetap grunnet plassering i forskjellige etasjer. Gjennom analyse av måledata fremkommer det ingen betydelig forskjell i termisk komfort mellom gruppen av rom med ulik overflatebehandling.

IV På hvilken måte påvirkes utformingen av utdanningsarealer av desentral ventilasjon?

I en skole uten sentral ventilasjon frigjøres areal og volum. Grunnet manglende føringer i tak har rommene større takhøyde sammenlignet med hva som er vanlig i skoler med sentralt ventilasjonsanlegg. Dette gjør noe med de romlige kvalitetene, og rommet får mulighet for større inntak av lys og luft. Arealmessig muliggjøres et ekstra grupperom grunnet mindre plassbehov til tekniske systemer. Et ekstra grupperom er verdifullt da noen barn kan ha særskilte behov og trenger tilrettelagt undervisning utenfor selve klasserommet.

7.0 Referanser

Arbeidstilsynet. § 2-8. *Romhøyde*.

Byggalliansen. (2020). *Grønn materialguide, Veileder i miljøriktig materialvalg, versjon 3.1*.

Tilgjengelig fra: https://byggalliansen.no/wp-content/uploads/2020/09/Grønn-Materialguide-v3_1-002.pdf.

Direktoratet for Byggkvalitet (DiBk). (2017). *Slik Leser du byggteknisk forskrift*. Tilgjengelig

fra: <https://dibk.no/regelverk/alt-om-tek/slik-leser-du-tek17/>.

Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort, Analysis and Application in Environmental Engineering*.

FHI, R. B., Marianne Bjerke, Finn Martinsen, Johan Øvrevik. (2016). *Inneklima i skoler og barnehager, helsemessig betydning for barn*.

FNs Klimapanel. (2022). *Hovedfunn i tredje del i sjette hovedrapport*. Tilgjengelig fra:

<https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/fns-klimapanel-ipcc/dette-sier-fns-klimapanel/sjette-hovedrapport/hovedfunn-i-tredje-del-i-sjette-hovedrapport/>.

GMBH, K. *TEKNISK DATABLAD*

KEIM LIGNOSIL - INCO. Tilgjengelig fra:

https://www.keim.dk/fileadmin/user_upload/download-center/dk/TekniskeDatablade_DK/KEIM_LIGNOSIL-INCO_0816.pdf.

Grønn Byggallianse, B. *ECOproduct*. Tilgjengelig fra:

<https://byggeportalen.no/EcoProduct#/Produsent/105>.

Helsedirektoratet. (2014). *IS-2073, Miljø og helse i skolen, Veileder til forskrift om miljørettet helsevern i barnehager og skoler*. Tilgjengelig fra:

<https://dibk.no/globalassets/innemiljo/publikasjoner/miljo-og-helse-i-skolen.-veileder-til-forskrift-om-miljorettet-helsevern-i-barnehager-og-skoler.-is-2073.pdf> (lest 09.03.22).

Knut R. Skulberg, A. Q. N., Lars O. Goffeng, Armin Wisthaler. (2019). *Health and Exposure to VOCs From Pinewood in Indoor Environments*.

Kucera, B. (1998). *Treets oppbygging og vedanatomi*.

Lan, L., Tang, J. Y., Wargoocki, P., Wyon, D. P. & Lian, Z. W. (2022). *Cognitive performance was reduced by higher air temperature even when thermal comfort was maintained over the 24-28 degrees C range*. *Indoor Air*, 32 (1). doi: 10.1111/ina.12916.

- LesProm. (2021). *CLTP Tasmania launches world's first hardwood CLT*. Tilgjengelig fra: https://www.lesprom.com/en/news/CLTP_Tasmania_launches_world's_first_hardwood_CLT_99304/.
- Lovdata. (1995). *Forskrift om miljørettet helsevern i barnehager og skoler m.v.* Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1995-12-01-928>.
- Lovdata. (1998). *Lov om grunnskolen og den vidaregåande opplæringa (opplæringslova)*. Tilgjengelig fra: https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1998-07-17-61/KAPITTEL_11?q=opplæringslova.
- Lovdata. (2012). § 19. *Inneklima/luftkvalitet, Forskrift om miljørettet helsevern i barnehager og skoler m.v.* Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/forskrift/1995-12-01-928/§19>.
- Multiconsult. (2019). *Gevinst- og klimaanalyse av Hanstad barne- og ungdomsskole - modulbygg i massivtre*. Tilgjengelig fra: <https://docplayer.me/132918172-Gevinst-og-klimaanalyse-hanstad-barne-og-undomsskole-modulbygg-i-massivtre.html>.
- Nettdoktor. *Gutters høyde og vekt i forhold til alder*. Tilgjengelig fra: <https://www.nettdoktor.no/helseraad/fakta/gutterveksttabell.php>.
- Norsk Klimaservicesenter. (2021). *Observasjoner og værstatistikk*.
- Norsk Kommunalteknisk forening. (2017). *Elverum bygger Norges mest innovative skole*. Tilgjengelig fra: <https://www.kommunalteknikk.no/elverum-bygger-norges-mest-innovative-skole.5997219-40825.html> (lest 22.02.22).
- NTNU, S. (2007). *ENØK i bygninger, Effektiv energibruk*.
- O. Seppanen, W. F. (2002). RELATIONSHIP OF SBS-SYMPOMS AND VENTILATION SYSTEM TYPE IN OFFICE BUILDINGS.
- SINTEF. (2021). *Ny datainfrastruktur skal støtte opp om forskning på framtidens energifleksible og sunne bygninger*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/ny-datainfrastruktur-skal-stotte-opp-om-forskning-pa-framtidas-energifleksible-og-sunne-bygninger/>.
- Sintef Byggforsk. (2002). Varmegjenvinnere i ventilasjonsanlegg. *Byggforskserien*, 552.340 Del II.
- Sintef Byggforsk. (2005a). Fordeling av ventilasjonsluft i rom. *Byggforskserien*, 552.351.
- Sintef Byggforsk. (2005b). Inneklima og ventilasjon i skoler. *Byggforskserien*, 552.311.
- Sintef Byggforsk. (2006). Astma, allergi og inneklima. *Byggforskserien*, 220.330.
- Sintef Byggforsk. (2017a). Godt inneklima i yrkesbygninger. *Byggforskserien*, 421.505.
- Sintef Byggforsk. (2017b). Inneklimaproblemer i yrkesbygninger. *Byggforskserien*, 700.105.

- Sintef Byggforsk. (2017c). Luftmengder i ventilasjonsanlegg. Krav og anbefalinger. *Byggforskserien*, 421.503.
- Sintef Byggforsk. (2017d). Termisk Inneklima. Betingelser, tilrettelegging og målinger. *Byggforskserien*.
- Sintef Byggforsk. (2017e). *Trehus*.
- SINTEF Byggforsk, P. B. o. B. T. L. (1992). *Solinnstråling gjennom vinduer på klare, halvt overskyede og helt overskyede dager*. Tilgjengelig fra: https://www.sintefbok.no/book/index/413/solinnstraaling_gjennom_vinduer_paa_klare_halvt_overskyede_og_helt_overskyede_dager.
- SINTEF, T. H. D., Tor Arvid Vik. (2001). *Hybrid ventilasjon, Muligheter og barrierer – Eksempler – Kontrollstrategier – Prosjekteringsverktøy*.
- Skulberg, K. R., Nyrud, A.Q., Nore, K. (2022). Hygroscopic buffering effects in exposed cross-laminated timber surfaces and indoor climate in a Norwegian primary school.
- STAMI, S. (2019). *Inneklima*. Tilgjengelig fra: <https://noa.stami.no/tema/mechaniskfysisk-arbeidsmiljo/fysiske-faktorer/inneklima/>.
- Standard Norge. (2006). *NS-EN ISO 7730:2005 Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD indeks og lokal termisk komfort*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=158329>.
- Standard Norge. (2019). *NS-EN 16798-1:2019 Bygningers energiytelse, Ventilasjon i bygninger, Del 1: Inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk (Modul M1-6)*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1055687>.
- Tecalor. *LTM dezent 800 topline KEL GIT – Technische Daten*. Tilgjengelig fra: https://www.tecalor.de/de/produkte-informationen/alle_produkte/lueftung/dezentral/dez-800-topline-kel-git/ltm-dezent-800-topline-kel-git/technische-daten.html.
- Tecalor. *LTM Thermo-Lufter 1230 BI*. Tilgjengelig fra: https://www.tecalor.de/content/dam/tec/cdbassets/current/bedienungs-_u_installationsanleitungen/ltm_tl_1230_sbi_installationmanual_doc-00077337.pdf.

Tecalor. *LTM Thermo-Lüfter 200-50*. Tilgjengelig fra:

https://www.tecalor.de/content/dam/tec/cdbassets/current/bedienungs-_u_installationsanleitungen/lm_tl_200-50_veinstallationmanual_doc-00060649.pdf.

Thue, J. V. (2016). *Bygningsfysikk*: Fagbokforlaget.

Thue, S. G. o. J. V. (2002). *Fukt i bygninger*.

TNS Gallup. (2008). *Godkjenning av skoler etter forskrift om miljørettet helsevern*.

Tilgjengelig fra: <https://www.udir.no/tall-og-forskning/finn-forskning/rapporter/Godkjenning-av-skoler-etter-forskrift-om-miljørettet-helsevern-2008/>.

TreBruk AS. (2020). *Markedsanalyse KL- tre markedet i Norge 2020-2030*. Tilgjengelig fra:

<https://www.viken.skog.no/files/documents/brosjyrer/markedsanalyse-230120.pdf>.

Treteknisk. *KL-Tre SMART, Klarer vegger i KL-Tre uten isolasjon og kledning energikravet til*

TEK17? Tilgjengelig fra: <https://www.treteknisk.no/aktuelt/kl-tre-smart>.

Wargoeki, P., Porras-Salazar, J. A. & Contreras-Espinoza, S. (2019). The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*, 157: 197-204. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.04.046.

Williams, S.-. (2017). *Technical data sheet, Lacoma Clear 5*. Tilgjengelig fra:

http://syntemanorr.se/download/sherwin_williams_trä/tekniska_datablad/EM1143-0025.pdf.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway