NTNU
Det skapende universitet

Undersøkelse av varmetap ved Grong barneskole

Audun Bull Kristiansen

Master i energi og miljø
Oppgaven levert: Juni 2010
Hovedveileder: Per Olaf Tjelflaat, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosessteknikk

Oppgavetekst

1. Lag en oversikt, med basis i tidligere undersøkelser, over hvilke deler av bygningen og tekniske installasjoner hvor det er et forbedringspotensiale.
2. Foreta en detaljert undersøkelse av bygningen og av tekniske installasjoner ved hjelp av IR-kamera, helst under vindstille og kalde vinterforhold. Bildene skal analyseres, sammenlignes og diskuteres med resultatene fra tidligere undersøkelser. Beregninger bør også benyttes i denne prosessen.
3. Med basis i tidligere og egne undersøkelser skal det foreslås enøktiltak for byggets eier, og det skal gis råd velegnet for de som har planer om lignende bygninger med hybrid ventilasjon. Her må de nyeste byggeforskriftene trekkes inn i vurderingen og rådgivningen.

Oppgaven gitt: 26. januar 2010
Hovedveileder: Per Olaf Tjelflaat, EPT

Norges teknisk-
naturvitenskapelige universitet
NTNU

Institutt for energi- og prosessteknikk

EPT-M-2010-33

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Audun Bull Kristiansen

Våren 2010

Undersøkelse av varmetap for hybrid ventilert skolebygning

Investigation of Heat Losses for a Hybrid Ventilated School Building

Bakgrunn

Grong barneskole ble tatt i bruk høsten 1998. Skolebygningens design og installasjoner ble utviklet i tilknytning til et internasjonalt forskningsprosjekt hvor det ble lagt stor vekt på reduksjon av behovet for bruk av elektrisk energi. Primært ble det satset på reduksjon av energibehovet til belysning og til ventilasjonsvifter. Bygningen er spesiell ved at den har et hybrid ventilasjonsanlegg.

I undersøkelser av energibruk for skolebygningen, over et par år, ble det konstatert at det er en betydelig bruk av elektrisk energi til pumper i varmesystemet. I tillegg ble det konkludert med at bygningen må ha betydelige varmetap i bygningskonstruksjonen. Dette er videre sannsynliggjort gjennom detaljerte simuleringer av energibruken.

Mål

I denne oppgaven er det ett mål å undersøke bygningskonstruksjonen og ventilasjons- og varmetekniske komponenter nærmere for å bekrefte tidligere undersøkelser og for å fastslå hvor varmetapene er lokalisert.

Resultatene fra undersøkelsen forventes å bli nyttige som basis for utvikling av en plan for enøktiltak for byggets eier. Videre vil resultatene bli nyttige for andre som planlegger bygninger med ventilasjon av samme type.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Lag en oversikt, med basis i tidligere undersøkelser, over hvilke deler av bygningen og tekniske installasjoner hvor det er et forbedringspotensiale.
2. Foreta en detaljert undersøkelse av bygningen og av tekniske installasjoner ved hjelp av IR-kamera, helst under vindstille og kalde vinterforhold. Bildene skal analyseres, sammenliknes og diskuteres med resultatene fra tidligere undersøkelser. Beregninger bør også benyttes i denne prosessen.

3. Med basis i tidligere og egne undersøkelser skal det foreslås enøktiltak for byggets eier, og det skal gis råd velegnet for de som har planer om lignende bygninger med hybrid ventilasjon. Her må de nyeste byggeforskriftene trekkes inn i vurderingen og rådgivningen.

" - "

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

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

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

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

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

Ett -1 komplett eksemplar av originalbesvarelsen av oppgaven skal innleveres til samme adressat som den ble utlevert fra. Det skal medfølge et konsentrert sammendrag på maksimalt én maskinskrevet side med dobbel linjeavstand med forfatternavn og oppgavetittel for evt. referering i tidsskrifter).

Til Instituttet innleveres to - 2 komplette kopier av besvarelsen. Ytterligere kopier til eventuelle medveiledere/oppgavegivere skal avtales med, og eventuelt leveres direkte til de respektive. Til instituttet innleveres også en komplett kopi (inkl. konsentrerte sammendrag) på CD-ROM i Word-format eller tilsvarende.

NTNU, Institutt for energi- og prosessteknikk, 25. januar 2010

Olav Bolland
Instituttleder

Per Olaf Tjelflaat
Faglig ansvarlig/veileder

Norges teknisk-
naturvitenskapelige universitet
NTNU

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi
Institutt for energi- og prosessteknikk

MASTEROPPGAVE

av

Student Audun Bull Kristiansen

Våren 2010

Undersøkelse av varmetap ved Grong barneskole

Investigation of Heat Losses at Grong Primary School Building

Sammendrag

I ”Undersøkelse av varmetap ved Grong barneskole” er fasadene termografert utvendig og innvendig for å avdekke kuldebroer og infiltrasjon. Termograferingen ble foretatt uten å trykksette bygget. Årsaken til at termografering ble valgt som metode, er at det gir en rask oversikt over temperaturforskjeller på fasadene. Ut fra temperaturmålinger og en antatt endimensjonal varmestrøm gjennom fasadene, ble varmegjennomgangskoeffisienten til ulike bygningskomponenter beregnet.

I en tidligere undersøkelse var det beregnet at avgitt effekt gjennom ytterveggene og dørene på Grong barneskole var 2-3 ganger høyere enn det som var planlagt under dimensjoneringen. Det ble mistenkt at årsaken var kuldebroer, stor overflateareal, lite isolasjon i gulvene og et høyt energiforbruk til pumper. Skolen ble planlagt med tanke på å oppnå et lavt energiforbruk. Elektrisitetsforbruket ble redusert gjennom lavt trykkfall i luftveiene. I tillegg er energibruken til vifter redusert ved at ventilasjonen i stor grad drives av oppdriftskrefter.

Termograferingen tyder på at rammene i ytterdørene er betydelige kuldebroer.

Beregninger viser at den installerte effekten for oppvarming av toalettene trolig ville vært tilstrekkelig dersom toalettene hadde vært uten kuldebroer og infiltrasjonen ikke hadde vært større enn normalt. På grunn av at varmetapet ble større enn beregnet, er det maksimale effektbehovet for oppvarming dobbelt så stort som installert effekt. En del av den tilførte effekten tapes til grunnen, på grunn av mangelfull isolering av gulv mot grunn. Når effektbehovet i tillegg økes på grunn av kuldebroer i hjørnene, blir toalettene ubehagelig kalde. Det anbefales at det bygges en svalgang rundt toalett-utbyggene for å redusere varmetapet fra ytterdørene i garderoben og toalettveggene.

På avtrekksloftet ble det oppdaget infiltrasjon flere steder. Ved oppføring av lignende bygninger må man være mer nøye mer utførelsen av vindtettingen på avtrekksloftet. I tillegg må man prøve å unngå å få like mange hjørner. I hjørner vil det alltid bli økt fare for infiltrasjon.

Siden kjelleren er oppvarmet, burde gulvet vært bedre isolert. Kjellergulvets effekttap til grunnen er høyt. Mulighetene for å etterisolere kjellergulvet innvendig bør undersøkes. Gulvene mot grunn på resten av skolen er også dårlig isolert, men det er vanskelig å utbedre etter at bygget er bygget.

Klasserommene oppleves å være kalde deler av året. Særlig gjelder det klasserommene i enden av fløyene som har to yttervegger. Det foreslås at det gjøres en vurdering på muligheten for innvendig etterisolering av treveggene som er forblendt med tegl. Etterisolering bør vurderes opp mot muligheten for å installere ekstra radiatorer eller elektriske varmeovner.

Målinger av det elektriske effektforbruket tyder på at pumpene til gulvvarmen og radiatorene går på tilnærmet maksimal effekt hele året. Derfor anbefales det å undersøke hvordan pumpene til radiatorene og gulvvarmen kan reguleres bedre, slik at det ikke brukes energi til drift av pumper i perioder med lavt oppvarmingsbehov.

Forord

Denne rapporten er utarbeidet for Grong kommune for å kartlegge hvordan Grong barneskole kan oppgraderes for å redusere energiforbruket. I tillegg vil rapporten være nyttig for dem som planlegger lignende bygninger, for å unngå tilsvarende problemer med kuldebroer.

Takk til professor Per Olaf Tjelflaat, som har vært tilgjengelig og gitt meg råd om hvordan jeg kunne gjøre et overslag for U-verdien på veggene, hjulpet meg med bakgrunnsmateriale fra tidligere undersøkelser av bygget, gitt meg bygningstegninger og kjørt med meg til Grong og assistert med fotografering av bygget.

Takk til Arne Strøm hos Rambøll Norge AS, avdeling Trondheim, for hjelp til å analysere varmebildene og veiledning i bruk av termografi-kameraet.

Takk til vaktmestrene Jens Thomassen og Jens Gaundal ved Grong barneskole som har vært hjelpsomme og gjestfrie ved mine besøk på skolen.

Trondheim 22.06.2010

Audun Bull Kristiansen

Audun Bull Kristiansen

Innledning

Det er et økende fokus på lavenergihus og passivhus, noe som blant annet har resultert i en ny norsk standard NS3700 ” Kriterier for passivhus og lavenenergihus – Boligbygninger” som ble fastsatt i april 2010. Men siden kun en liten del av bygningsmassen er nybygg, er det viktig å se på hvordan eksisterende bygg kan oppgraderes.

I denne oppgaven skal varmetapet fra bygningskonstruksjonen på Grong barneskole studeres ved hjelp av termografi, temperaturmålinger og beregninger. Tidligere undersøkelser av Wachenfeldt(1) og Tjelflaat(2) har vist at energiforbruket ved skolen er adskillig høyere enn forventet. Det mistenkes at årsaken er kuldebroer, steder der varmegjennomgangen i ytterveggen er betydelig høyere enn ellers i veggen.

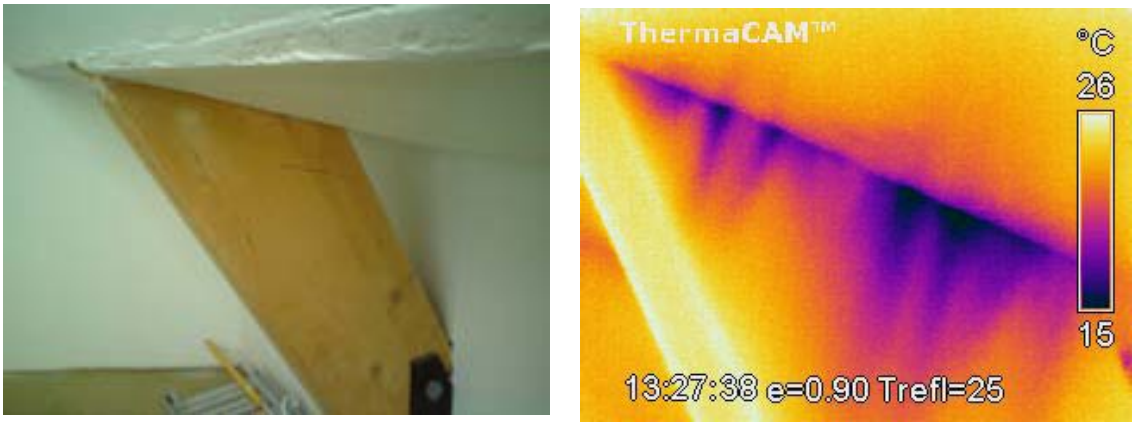
For å undersøke hypotesen skal fasadene termograferes innvendig og utvendig for å finne overflatetemperaturene. Med utgangspunkt i overflatetemperaturene skal U-verdiene for de ulike delene av bygget beregnes overslagsmessig. Ved å sammenligne U-verdiene mot kravene i forskriftene da bygget ble bygget og mot dagens krav, vurderes standarden til bygningsdelene.

Til slutt diskuteres det hvordan bygningen kan oppgraderes for å redusere energiforbruket og bedre komforten.

Resultatene vil kunne hjelpe dem som planlegger lignende bygg, så de ikke gjør de samme bygningsmessige feilene.

Hva er termografi?

Ordet termografi er satt sammen av ”thermo”(varme) og ”graphe”(bilde). Et bilde tatt med et termografi-kamera kalles et varmebilde og viser temperaturfordelingen til overflaten som termograferes. Fargenes referanse til temperatur er ikke fast, men stilles av termograføren. Ved bruk av automatisk skala, som i figur 1, går skalaen fra høyeste til laveste registrerte temperatur. Her tilsvarer hvitt 26 °C, mens svart tilsvarer 15 °C. Alternativt stilles skalaen manuelt. Dersom skalaen hadde vært stilt manuelt fra 18-22 °C ville hvitt tilsvart temperaturer fra 22 °C og høyere, mens svart ville tilsvart temperaturer fra 18 °C og lavere. Datoen i 2010 da bildet ble tatt og utetemperaturen ved termograferingen er angitt i parentes bak bildeteksten.



Figur 1 Varmebildet viser at kald luft siver inn øverst på siden av bjelken. (17.03, 3 °C)

Definisjoner

bruksareal: Bruksareal(BRA) er det arealet av bruksenheter og felles deler som ligger innenfor omsluttende vegger.(3)

bruttoareal: Bruttoareal(BTA) er areal av måleverdige deler begrenset av ytterveggs utside og til midt i eventuell vegg mot naboleilighet eller felles del.(3)

dimensjonerende utetemperatur, θ_{DU} , er stedets laveste gjennomsnittstemperatur over 3 døgn i løpet av en 30-års periode.(4)

fuge: mellomrom eller forbindelse mellom deler, elementer eller komponenter i en konstruksjon. Brukes også som betegnelse på selve fugetetningen.(5)

emissivitet/emisjonsfaktor: er et tall mellom 0 og 1 som angir utstrålt energimengde fra materialoverflaten i forhold til ustrålingen fra en ideell svart flate med samme temperatur.(6)

ENØK: Forkortelse for Energi-økonomisering. ENØK innebærer at energien skal brukes i den form, mengde og til den tid som totalt sett er mest lønnsomt for samfunnet når alle fordeler og ulemper er veid mot hverandre. Det er ikke ønskelig å spare energi dersom det fører til dårligere arbeidsmiljø eller investeringen blir så stor at den ikke betaler seg tilbake på sikt.(7)

EOS: Energi-overvåkning-system

EPS: ekspandert polystyren(isolasjonsmateriale).

grunnmur: se ringmur.

kortsluttningsventilasjon: Kortslutningsventilasjon er et begrep som benyttes i de tilfeller der hele eller deler av tilluften går direkte ut i avtrekket. Kortsluttningsventilasjon fører til redusert tilførsel av frisk luft i oppholdssonen.(8)

kuldebro: En kuldebro er en del av konstruksjonen der den ellers ensartede varmemotstanden endres betydelig, ofte på grunn av materialer med høyere varmekonduktivitet, for eksempel etasjeskillere av betong.(9)

kuldebrobryter: En kuldebrobryter er et sjikt av varmeisolerende materiale som er lagt inn i en konstruksjon for å redusere virkningen av kuldebroen.(10)

lavenergihus: I følge den nye norske standarden for lavenergihus og passivhus, NS 3700(11), er et lavenergihus et hus som har lavere varmetapstall enn angitt i tabellen under, beregnet etter NS 3031. Luftmengdene som skal benyttes i beregningene er gitt i Annex A i NS 3700. A_{fl} er oppvarmet del av bruksareal(BRA).

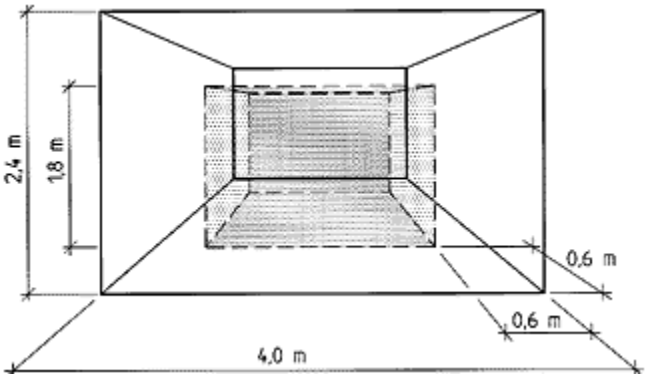
	Varmetapstall [W/ m^2K]		
	Bolig der $A_{fl} < 100$ m^2	Bolig der $100 < A_{fl} < 250$ m^2	Bolig der $A_{fl} > 250$ m^2
Lavenergihus klasse 1	0,80	0,75	0,65
Lavenergihus klasse 2	1,05	0,95	0,80
Passivhus	0,60	0,55	0,50

I tillegg angir standarden minstekrav til U-verdier for bygningsdeler og krav til netto energibehov til oppvarming. Levert mengde fossil og elektrisk energi skal være mindre enn totalt netto energibehov fratrukket halvparten av energibehovet til varmtvann.

nettoareal: Nettoareal er summen av arealene på de enkelte rom, målt på innsiden av rombegrensende bygningsdeler.(3)

normalisert kuldebroverdi: samlet stasjonær varmestrøm fra kuldebroer dividert med oppvarmet del av BRA.(12)

oppholdssonen: Normalt begrenses kravene til termisk komfort til en oppholdssone som vist i figuren. Oppholdssonen begrenses horisontalt av golvet og et plan 1,8 m over golvet. Vertikalt begrenses sonen av loddrette plan parallelle med rommets vegger, i en avstand på 0,6 m fra disse. (13)



operativ temperatur: Den operative temperaturen er tilnærmet lik middelverdien mellom lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen, når lufthastigheten er under 0,4 m/s.(14)

passivhus: Passivhus tar i bruk mest mulig passive tiltak for å redusere energibehovet, f.eks. ekstra varmeisolasjon, ekstra god tetthet og passiv utnyttelse av solvarme.(15) Se også under definisjonen av ”Lavenergihus”.

ppm: parts per million.

ringmur: Ringmur har man når det er gulv mot grunnen, dvs. ikke kjeller. Ringmuren går rundt platen på mark og et stykke ned i grunnen for å ta opp eventuelle høydeforskjeller og være et fundament for ytterveggen. Grunnmur brukes om yttervegger i kjeller og kryperom.

TEK: Teknisk forskrift til plan og bygningsloven.

termisk komfort: Termisk komfort er en subjektiv følelse av å være tilfreds med de termiske omgivelsene. Vi ønsker det verken kaldere eller varmere, verken for kroppen som helhet eller for de enkelte kroppsdelene som for eksempel føtter eller nakke.(10)

termogram: et varmebilde som er lagret digitalt.(16)

termografi: bestemmelse og gjengivelse av fordelingen av overflatetemperaturen ved å måle IR-strålingens tetthet fra en overflate, inkludert tolking av tilfeldige mekanismer som danner uregelmessigheter i varmebildene.(17)

tilsynelatende strålingstemperatur: temperatur som er bestemt ut fra totalradiansen som er målt. Denne temperaturen er den ekvivalente temperaturen på et svart legeme som ville ha produsert den samme totalradiansen.(17)

totalradians: Varmestrøm ved stråling dividert med den faste vinkelen i retning $\vec{\Delta}$ og projeksjonsflaten loddrett på denne retningen.(17)

U-verdi: Varmegjennomgangskoeffisienten, U(W/m^{2}K), angir stasjonær varmestrømstetthet gjennom en konstruksjon dividert med temperaturforskjellen mellom luften på varm side og luften på kald side.(18)

varmebilde: bilde som produseres av et målesystem for IR-stråling, og som gjengir fordelingen av den tilsynelatende strålingstemperaturen på en overflate.(17)

varmeovergangsmotstand: U-verdien er den inverse av den totale varmeovergangsmotstanden. Den totale varmeovergangsmotstanden for en vegg er satt sammen av innvendig varmeovergangsmotstand, utvendig varmeovergangsmotstand og summen av varmeovergangsmotstandene for sjiktene i veggen. Den innvendige varmeovergangsmotstanden for en vegg beskriver netto varmeutveksling mellom veggen og rommet.(19)

Innhold

SAMMENDRAG ..... **II**

FORORD ..... **III**

INNLEDNING ..... **IV**

HVA ER TERMOGRAFI? IV

DEFINISJONER ..... **V**

1 TERMOGRAFERING AV BYGNINGER **1**

1.1 INNSTILLING AV EMISJONSFAKTOREN 1
1.2 PROSEDYRE FOR TERMOGRAFERING 2

2 VANLIGE KILDER TIL VARMETAP I BYGNINGER **3**

2.1 KULDEBROER 3
2.2 INFILTRASJON 4

3 BEREGNING AV U-VERDI PÅ BAKGRUNN AV INNVENDIG VARMEOVERGANGSMOTSTAND **6**

3.1 VERDIEN AV DEN INNVENDIGE VARMEOVERGANGSMOTSTANDEN 7

4 USIKKERHET I BEREGNING AV U-VERDI **8**

5 MEDIÅ BARNESKOLE PÅ GRONG **9**

5.1 BYGNINGSKONSTRUKSJONEN VED SKOLEN 9
5.1.1 Ventilasjonssystemet *9*
5.1.2 Ytterveggene av tre i klasserommene *10*
5.1.3 Gulvet i klasserommene *11*
5.1.4 Toalettveggene *11*
5.1.5 Taket på toalettene *11*
5.2 TIDLIGERE UNDERSØKELSER AV ENERGIFORBRUKET VED SKOLEN 11
5.2.1 Energibruk *12*
5.2.2 Ventilasjonssystemet *12*
5.2.3 Sensitivitetsanalyse *13*
5.2.4 U-verdiene for de ulike bygningsdelene *13*
5.2.5 Varmetap til grunnen *14*
5.2.6 Pumper og EOS *14*
5.2.7 Varmetap fra tilluft til kjellervegger *15*
5.3 EKSISTERENDE TILTAK FOR Å SPARE ENERGI I BYGGET 15

6 KALIBRERING AV TERMOGRAFI-KAMERAETS TEMPERATURMÅLINGER **16**

7 TERMOGRAFERING AV GRONG BARNESKOLE **19**

7.1 TRYKKET I BYGGET 19
7.2 VÆR OG TEMPERATURER UNDER TERMOGRAFERINGEN 20
7.3 DØRENE 22
7.4 TOALETTENE 27
7.4.1 Toalett 137 ..... *28*
7.4.2 Toalett 135 ..... *39*
7.4.3 Toalett 136 ..... *40*

7.5 LOFTET 42
7.6 KJELLEREN 47
7.6.1 U-verdien for kjellergulvet 50
7.6.2 U-verdien for kjellerveggen 52
7.7 KLASSEROMMENE 53
7.7.1 U-verdien til gulv mot grunn 58
7.8 VEGGSTOLPER I KLASSEROM 61
7.9 RINGMUREN 65

8 VURDERING AV EFFEKTBEHOVET FOR OPPVARMING AV TOALETTENE 67

8.1 VARMETAPET FRA ET GULV MED GULVVARME 67
8.2 BEREGNING AV DIMENSJONERENDE EFFEKTBEHOV 67

9 HVA FØRER TIL ELEKTRISK EFFEKTBRUK UTENFOR DRIFTSTIDEN? 70

10 HVA BURDE VÆRT GJORT ANNERLEDES HVIS ET TILSVARENDE BYGG SKULLE VÆRT BYGGET I DAG? 72

10.1 UTVENDIG ISOLERING AV RINGMUREN 72
10.2 MER ISOLASJON I GULV MOT GRUNN 73
10.3 MER ISOLASJON I YTTERVEGGER 74

11 HVORDAN KAN BYGNINGEN OPPGRADERES FOR Å REDUSERE VARMETAPET? 75

11.1 REDUSERE ENERGIFORBRUKET TIL TEKNISK UTSTYR 75
11.2 TETTING AV FUGER PÅ LOFTET 75
11.3 SESONGISOLERING AV LOFTSVINDUER 75
11.4 BYGGE EN SVALGANG RUNDT TOALETTET 76
11.5 ETTERISOLERE TOALETTVEGGENE UTVENDIG 77
11.6 INSTALLERE EN EKSTRA VARMEOVN PÅ HVERT AV TOALETTENE 77
11.7 ETTERISOLERE RINGMUREN UTVENDIG 78
11.8 ETTERISOLERE ELLER INSTALLERE EKSTRA OVNER I KLASSEROMMENE 79
11.9 ETTERISOLERE GULVET I DISTRIBUSJONSKJELLEREN FOR VENTILASJONSLUFT 80

12 KONKLUSJON 81

REFERANSER 82

VEDLEGG 88

V1 TERMOGRAFI SOM METODE 88
Hvordan beregner termografi-kameraet overflatetemperaturen? 88
Hva beskriver emissiviteten? 88
Refleksjon 88
Avstand til overflaten 88
Valg av palett 89
Fordeler og ulemper med manuell skala 89
V2 TERMOGRAFIKAMERAET THERMACAM™ E2 89
Utstyrets begrensninger 89
Termografi-kameraets tekniske data 89
Kalibrering av termografi-kameraets temperaturmåling 90
V3 KORREKSJON AV MÅLT TEMPERATUR TIL DIMENSJONERENDE VERDI 90

1 Termografering av bygninger

1.1 Innstilling av emisjonsfaktoren

Emisjonsfaktoren brukes av termografi-kameraet for å regne ut overflatetemperaturen ut fra strålingen som sendes ut fra overflaten. Derfor er det viktig å angi emisjonsfaktoren noenlunde korrekt for å få pålitelige temperaturmålinger. For bygningsmaterialer ligger emisjonsfaktoren stort sett mellom 0,85 og 0,95, noe som er vist i tabell 1.1.1.

Tabell 1.1.1 Emisjonsdata for noen typiske bygningsmaterialer (20)

Overflatemateriale	Emisjonsfaktor
Furu, høvlet, ubehandlet	0,83
Gipsplate, ubehandlet	0,90
Tapet, svakt mønstret, lys grå	0,85
Fasadetegl, rød	0,92
Puss, grå	0,92
Betong, tørr	0,95
Glass	0,86(21)

Fordi variasjonene i emisjonsfaktoren er så små, er det vanlig å bruke en fast emisjonsfaktor på 0,90 ved termografering i bygninger.(20) Det ville vært tungvint å stille inn emisjonsfaktoren for hvert enkelt materiale. I tillegg er det som regel flere ulike materialer i samme bildet. Ulempen med å ikke stille inn emisjonsfaktoren nøyaktig, er at det blir større usikkerhet i temperaturmålingene. Betongen, med emissivitet 0,95, kan derfor teoretisk fremstå som rundt 4 grader varmere enn den egentlig er ut fra i ligning 1-3, når emissiviteten stilles til 0,90. Ligning 1-3 forutsetter at termografikameraet beregner overflatetemperaturen til 273 K ut fra ligning 1-2, som er en omskrevet form av Stephan Bolzmanns lov i ligning 1-1.

$$Q_{emittert} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \qquad \text{(ligning 1-1)}$$

$$T_s = \sqrt[4]{Q_{emittert} / \varepsilon \cdot \sigma} \qquad \text{(ligning 1-2)}$$

$$T_s(\varepsilon = 0{,}95) = \frac{T_s(\varepsilon = 0{,}90) \cdot \sqrt[4]{0{,}90}}{\sqrt[4]{0{,}95}} = \frac{273\text{K} \cdot \sqrt[4]{0{,}90}}{\sqrt[4]{0{,}95}} = 269\text{K} \qquad \text{(ligning 1-3)}$$

Et praktisk forsøk der termografikameraets temperaturmålinger på en betongvegg ble sammenlignet når emissiviteten ble endret mellom 0,85 og 0,95, viste at temperaturforskjellen som følge av unøyaktig innstilt emisjonsfaktor var betydelig mindre enn teoretisk beregnet. Temperaturforskjellen ved en endring i emmisiviteten fra 0,90 til 0,95 var under 1 °C(tabell 1.1.2). Gjennomsnitts-temperaturen i tabell 1.1.2 er gjennomsnitts-verdien av to målinger. Hver av målingene ble utført med termografi-kameraet i average-modus, slik at den avleste temperaturen var gjennomsnitts-temperaturen innenfor et avgrenset område i varmebildet. Grunnen til at kameraet ble satt i average-modus var at usikkerheten i veggens temperatur blir mindre når den bygger på en gjennomsnittsmåling i forhold til en punktmåling.

Tabell 1.1.2 Temperaturmålinger som funksjon av emissivitet

Emissivitet	Gjennomsnittstemperatur
0,85	15,5 °C
0,90	16,1 °C
0,95	16,9 °C

1.2 Prosedyre for termografering

Termograferingen har blitt utført med utgangspunkt i prosedyren gitt i NS-EN 13187 ”Bygningers termiske egenskaper - Kvalitativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjermer - Infrarød metode”(22). Følgende punkter ble vektlagt:

- Konstruksjonstegningene skal studeres hvis de er tilgjengelige(23)
- Ved vurdering av isolering og kuldebroer skal det være minimum 10 graders temperaturforskjell mellom inne og ute i et halvt døgn før termograferingen foretas, siden det tar tid å endre temperaturen i tunge bygningsdeler med stor varmekapasitet. (24)
- Under termograferingen skal det være minimum 15 graders temperaturforskjell mellom inne og ute.(24)
- Lufttemperaturen bør være stabil både inne og ute. Temperaturen bør ikke variere med mer enn +/- 2 °C inne og +/- 5 °C ute under termografering.(24)
- Under termograferingen bør vindhastigheten ikke overstige 6 m/s.(25)
- Informasjon om utetemperatur, skydekke, nedbør og vindforhold skal noteres.(26)
- Den maksimale og minimale utetemperaturen i døgnet før termograferingen begynte og under termograferingen skal noteres.(26)
- Innetemperaturen under termograferingen skal noteres.(26)
- Bygningens orientering med tanke på himmelretning skal noteres.(26)
- Bilder eller skisser av bygget skal dokumentere hvor varmebildene er tatt.(26)
- Trykkforskjellen mellom inne og ute bør være minst 5 Pa ved kontroll av infiltrasjon. (23)

Under tolkningen av varmebildene er det viktig å være oppmerksom på at flere faktorer kan påvirke veggens temperatur:

- våte flater vil bli nedkjølt fordi de avgir varme til vann som fordamper. (27)
- sterk solinnstråling mot fasadene øker veggens temperatur.
- store temperaturvariasjoner over døgnet inne eller ute påvirker veggens temperatur i ettertid.
- ulik solinnstråling på veggene på grunn av vegetasjon eller bebyggelse kan føre til temperaturforskjeller på veggen.(27)
- rør til radiatorer og andre skjulte elementer kan gi lokal avkjøling eller oppvarming av veggen.
- luftet utvendig kledning gjør det vanskeligere å oppdage infiltrasjon, kuldebroer og isolasjonssvikt utenfra.(28)

2 Vanlige kilder til varmetap i bygninger

Siden målet med oppgaven er å avsløre hvor varmen tapes fra bygget, presenteres to kilder til varmetap som kan avsløres ved termografi; kuldebroer og infiltrasjon.

2.1 Kuldebroer

En kuldebro er en del av bygningskonstruksjonen som har vesentlig lavere varmemotstand enn konstruksjonen for øvrig. Kuldebroer oppstår som regel fordi bæresystemet inneholder materialer med høy varmekonduktivitet, som betong og metall, som bryter isolasjonssjiktet. Konsekvensene av kuldebroer er at den innvendige overflatetemperaturen blir redusert. Brukerne av rommet vil ofte kompensere for kalde innvendige overflater ved å øke lufttemperaturen. En tommelfingerregel sier at energiforbruket øker med 6 % for hver grad økning av innetemperaturen.(29)

Etter hvert som varmetapet fra fasadene i nye bygninger blir redusert som følge av økt isolasjonstykkelse og bedre tetthet, vil kuldebroene stå for en relativt større andel av varmetapet fra fasadene. Dersom faren for kuldebroer undervurderes under bygging kan energiforbruket bli adskillig høyere enn forventet. Et eksempel er Rockwool International sitt forskningssenter i Danmark, som ble superisolert med 0,45m glassull i veggene, 0,5 m i taket og 0,25 m i gulvet. Bygget hadde et forventet energiforbruk til oppvarming på 15 kWh/m^2 per år, men endte opp med et energiforbruk til oppvarming på 51 kWh/m^2 per år. Analyser viste at en viktig grunn til at oppvarmingsbehovet ble mer enn tre ganger høyere enn beregnet var at fundamentet, ventilasjonsrørene og vindusrammene var kuldebroer.(30-31)

Noen vanlige kuldebroer i bygninger er(9):

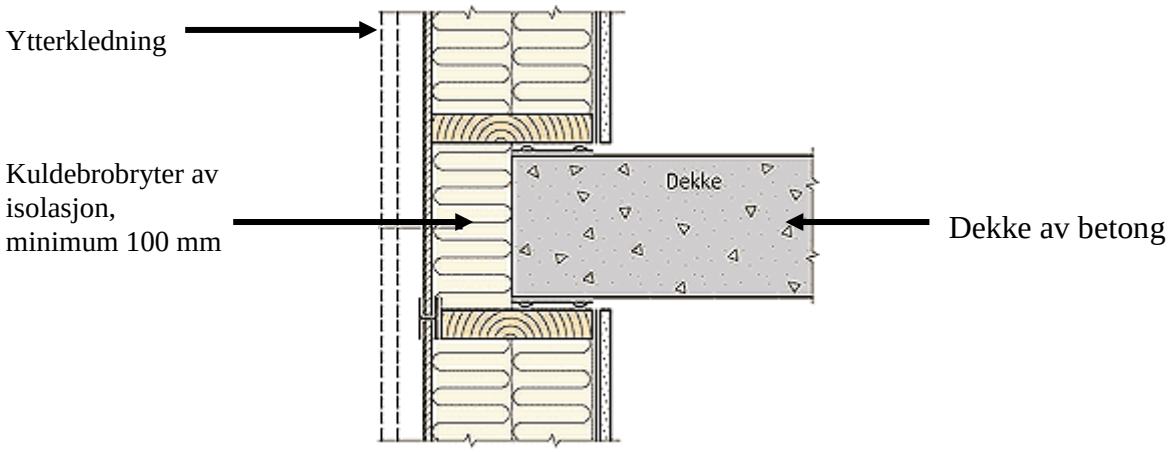
- bindingsverk
- bærebjelker og søyler
- kaldtvannrør
- kabelføringer
- ventilasjonskanaler

Samtidig som det er normalt å finne kuldebroer i hjørner og langs lister, er det ikke nødvendigvis en kuldebro selv om det er litt kaldere her enn på resten av veggen. På en kald dag kan innvendige hjørner være noen grader kaldere enn resten av veggen. Det er normalt, og skyldes ikke svikt i isolasjonen. Isoleringsfeil og infiltrasjon vil føre til kraftigere temperaturforskjeller. En av årsakene til at det er kaldere i hjørnene er at luftsirkulasjonen er dårligere her, slik at hjørnene ikke blir varmet opp av romluften i like stor grad som resten av veggen. Derfor er R_{si} høyere i hjørnene enn sentralt på veggen(tabell 3.1).
En annen årsak til at det er kaldere i hjørnene er at det utvendige overflatearealet er større enn det innvendige overflatearealet, noe som bidrar til å øke varmetapet fra hjørnene.(32)

Kuldebroer kan føre til(33):

- økt varmetap
- lave overflatetemperaturer
- redusert komfort
- overflate- og støvkondens
- temperaturspenninger

For å unngå kuldebroer fra betong, som har god varmeledning, legges det vanligvis inn en kuldebro-bryter av isolasjonsmateriale, som vist i figur 2.1.1.



Figur 2.1.1 Eksempel på kuldebrobryter mellom ytterkledning og betongdekke.(34)

Ligning 2-1 kan benyttes for å regne ut U-verdien til en bygningsdel inkludert U-verditillegg for kuldebroer:

$$U = U_0 + \frac{1}{A}\sum \psi_i \cdot l_i \qquad \text{(ligning 2-1)}$$

U = U-verdi modifisert for kuldebroer [W/m^{2}K]

$U_0 =$ U-verdi uten kuldebroer [W/m^{2}K]

A = Areal av bygningsdel [m^2]

$\psi_i =$ kuldebroverdi [W/mK]

l_i = omkretsen av kuldebroen [m]

$$U_l = \frac{1}{A}\sum \psi_i \cdot l_i = \text{Normalisert kuldebroverdi[W/m}^2\text{K]}$$

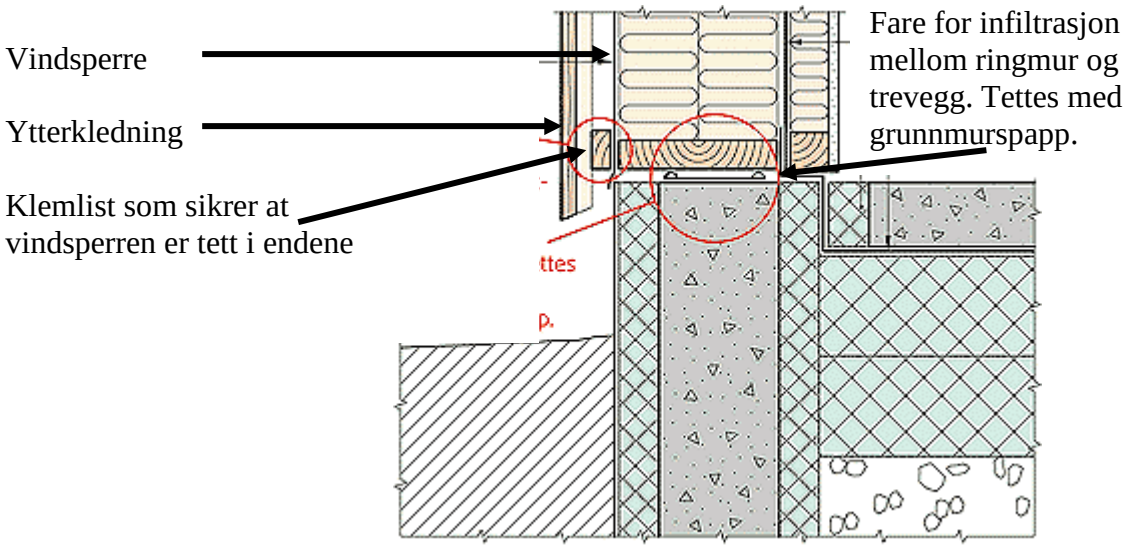
Normalisert kuldebroverdi skal ikke overstige 0,06 W/m^{2}K for skolebygg, der arealet angis som oppvarmet BRA.(35)

2.2 Infiltrasjon

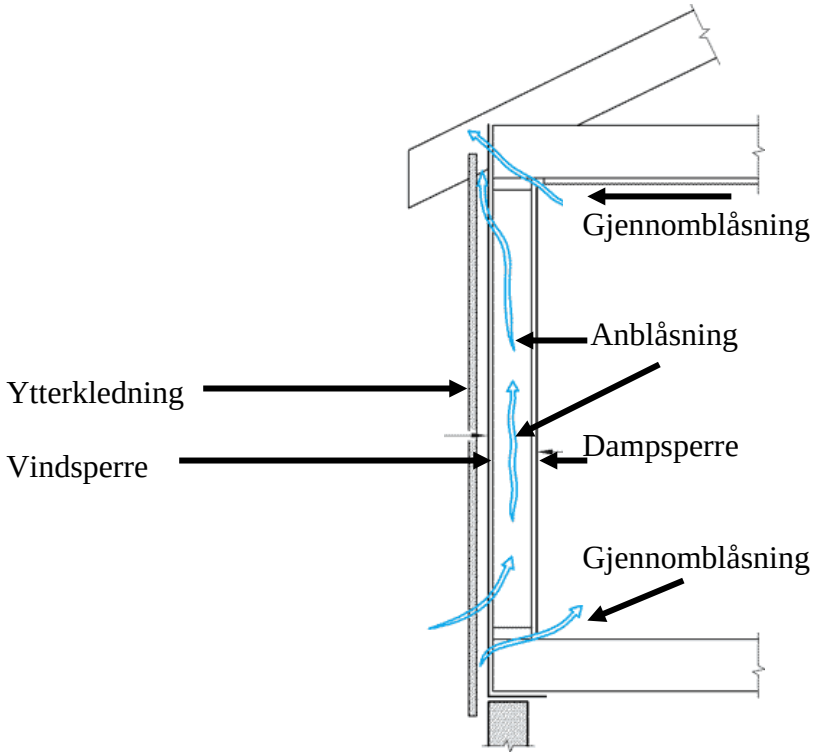
Erfaringene viser at infiltrasjon og isoleringsfeil er utbredt. Dermed blir U-verdien til konstruksjonene ofte høyere i praksis enn i teorien. I over 90 % av tilfellene der det klages på isolasjonen fordi det er kaldt inne, er problemet egentlig infiltrasjon, selv i nyere bygninger.(36) Infiltrasjonen skyldes små glipper i skjøtene i konstruksjonen. Ved å bruke ventilasjonsanlegget eller en annen sterk vifte til å skape undertrykk i bygget, kan infiltrasjonen forsterkes slik at infiltrasjonen fremkommer tydeligere på varmebildene. Dersom det ikke er noen trykkforskjell mellom inne og ute, kan bygningen se perfekt ut på varmebildene, selv om det er mange utettheter.(36)

Infiltrasjon blir synlig i varmebildene som kalde ”flammetunger” som stikker ut fra lekkasjepunktet på innsiden av veggen hvis uteluften er kaldere enn inneluften. Derfor bør termograferingen foretas innvendig. Da unngår man samtidig feil i målingene som skyldes reflektert sollys fra fasaden. Ved måling av lufthastigheten i lekkasjepunktet, kan man ut fra trykkforskjellen vurdere om infiltrasjonen er så stor at den bør utbedres eller ikke.(36)

Noen typiske steder der det oppstår infiltrasjon er langs gulvlister, rundt vinduer, langs taklister, rundt ytterdører og ved gjennomføringer i ytterveggen.(37) Derfor er det viktig å sikre utvendig vindtetting gjennom klemte skjøter i vindsperren(figur 2.2.1). I enkelte tilfeller trenger luften gjennom vindsperren, men ikke gjennom dampsperren eller innerkledningen. Det kalles anblåsning(figur 2.2.2). Ved anblåsning kjøler luften ned innerkledningen og går ut igjen et annet sted i vindsperren. Da er ikke luftgjennomstrømningen følbar fra innsiden av rommet, men den kan likevel oppdages med termografi siden veggen inne blir nedkjølt.(38)



Figur 2.2.1 Fare for infiltrasjon dersom vindsperren og grunnmurspappen ikke er ordentlig montert.(39)



Figur 2.2.2 Infiltrasjon(gjennomblåsning) og anblåsning(40)

3 Beregning av U-verdi på bakgrunn av innvendig varmeovergangsmotstand

Siden et av målene med oppgaven er å vurdere varmemotstanden for de ulike delene av bygget, beregnes bygningsdelenes U-verdi og sammenlignes mot kravene i dagens byggeforskrifter og byggeforskriftene fra 1987 som bygget ble planlagt ut fra. For å gjøre et overslag over U-verdien på bakgrunn av temperaturmålingene fra termografi-kameraet benyttes ligning 3-1.

$$U = \frac{T_{inne} - T_{si}}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})} \qquad (41) \quad \text{(ligning 3-1)}$$

U er varmegjennomgangskoeffisienten [W/m^{2}K]

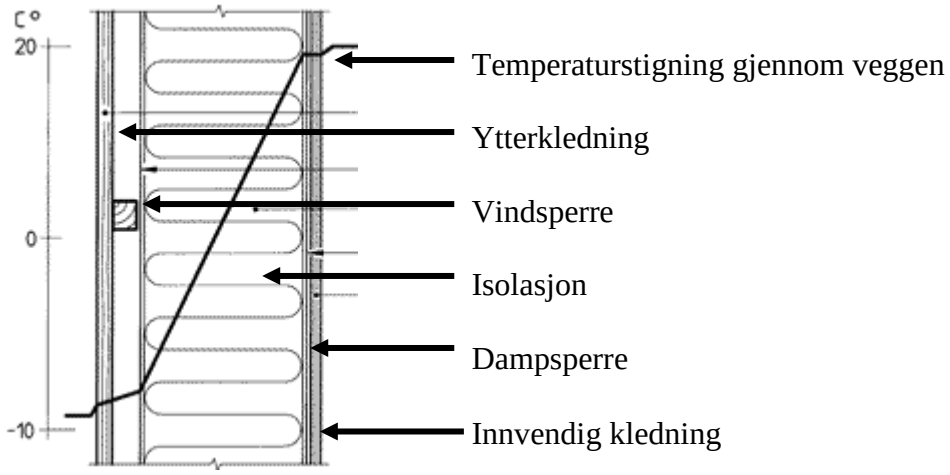
T_{inne} er innendørs lufttemperatur [K]

T_{si} er innendørs overflatetemperatur [K]

R_{si} er innvendig varmeovergangsmotstand gitt av tabell 3.1[m^{2}K/W]

T_{su} er utendørs veggtemperatur [K]

Formelen bygger på antagelsen om at effekten som avgis fra inneluften til innerveggen er den samme som effekten som ledes gjennom veggen. Forutsetningen for at det er riktig, er at det er endimensjonal varmestrøm, noe som er en rimelig antagelse ettersom varmestrømmen i hovedsak er innenfra og ut. Utendørs veggtemperatur settes tilnærmet lik lufttemperaturen ute når utetemperaturen er stabil.



Figur 3.1 Eksempel på temperaturfordelingen gjennom en vegg.

Tabell 3.1 Omtrentlige verdier for innvendig overgangsmotstand Rsi(29, 41-42)

Lokalisering	R_{si}[m^{2}K/W]
Sentralt på større overflater: - varmestrøm oppover - varmestrøm horisontalt - varmestrøm nedover	 0,10 0,13 0,17
På vindusglass og –rammer	0,13
I todimensjonalt hjørne	0,20
I tredimensjonalt hjørne	0,25

3.1 Verdien av den innvendige varmeovergangsmotstanden

Den nøyaktige verdien for den innvendige varmeovergangsmotstanden, Rsi, er ukjent. Verdiene i tabell 3.1 for Rsi sentralt på større flater er oppgitt av Geving til bruk i beregninger etter ligning 3-1.(41) Samme verdier for Rsi gjengis i NS-EN ISO 6946 ”Bygningskomponenter og -elementer. Varmemotstand og varmegjennomgang. Beregningsmetode”.(42)

Byggforsks anbefalte verdier for Rsi for bruk i beregning av overflatetemperatur etter ligning 3-1 er gjengitt i tabell 3.2. Byggforsk sine verdier virker å være mer generelle, ettersom de ikke tar hensyn til varmestrømmens retning eller skiller mellom hjørner og sentral på større flater. Samtidig påpekes det i Byggforskblad 720.015 at ”*Den innvendige varmeovergangsmotstanden er i praksis svært ofte langt høyere enn de varmeovergangsmotstandene som benyttes i energiberegninger basert på konstruksjonens materialegenskaper.*” (29) Ut fra dette utsagnet og de anbefalte verdiene i tabell 3.2, virker det som om erfaringene til Byggforsk tilsier at verdiene for Rsi er høyere enn det som er angitt i tabell 3.1. For å kunne få med i beregningene at Rsi er avhengig av varmestrømmens retning og er høyere i hjørner enn sentralt på større flater, benyttes verdiene fra tabell 3.1 i beregningene. Samtidig tas det høyde for at verdiene for Rsi i virkeligheten kan være høyere ved å legge inn en usikkerhet på 0,10.

Tabell 3.2 Anbefalte verdier for R_{si} ved beregning av U-verdi på bakgrunn av temperaturmålinger.(29)

Flate	**R_{si}[m^{2}K/W]**
Glass	0,13
Øvre halvdel av rom	0,25
Nedre halvdel av rom	0,35
Skjermet av møbler og lignende	0,50

4 Usikkerhet i beregning av U-verdi

For å kunne vurdere standarden for varmemotstanden til en bygningsdel på bakgrunn av den beregnede U-verdien, er det ønskelig å anslå usikkerheten i U-verdien. U-verdien er en funksjon av flere målte eller beregnede variabler(ligning 4-1).

$$U = f(T_{inne}, T_{ute}, T_{si}, R_{si}) \qquad \text{(ligning 4-1)}$$

Usikkerheten i U-verdien blir en funksjon av usikkerheten i de enkelte variablene i funksjonen for U. Det forutsettes at usikkerheten i enkeltmålingene er uavhengig av hverandre. Det stemmer ikke dersom flere av temperaturene er målt med samme sensor. I tillegg til termografikameraet, er det benyttet et CIE 305 termometer. Termometeret har mulighet for å koble til flere sensorer. I forsøkene har det blitt benyttet en røykgass-temperaturføler for måling av lufttemperatur og en overflate-temperaturføler for måling av overflatetemperatur. I de fleste forsøkene er hver av temperaturene beregnet med ulike sensorer, og målingene regnes derfor som uavhengige. Ved innsetting av utrykket for U fra ligning 3-1 i ligning 4-2 fås den resulterende feilen ΔU i ligning 4-3.

$$\Delta U = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial T_{inne}} \cdot \Delta T_{inne}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial T_{su}} \cdot \Delta T_{su}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial T_{si}} \cdot \Delta T_{si}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial R_{si}} \cdot \Delta R_{si}\right)^2} \qquad \text{(ligning 4-2)}$$

(43)

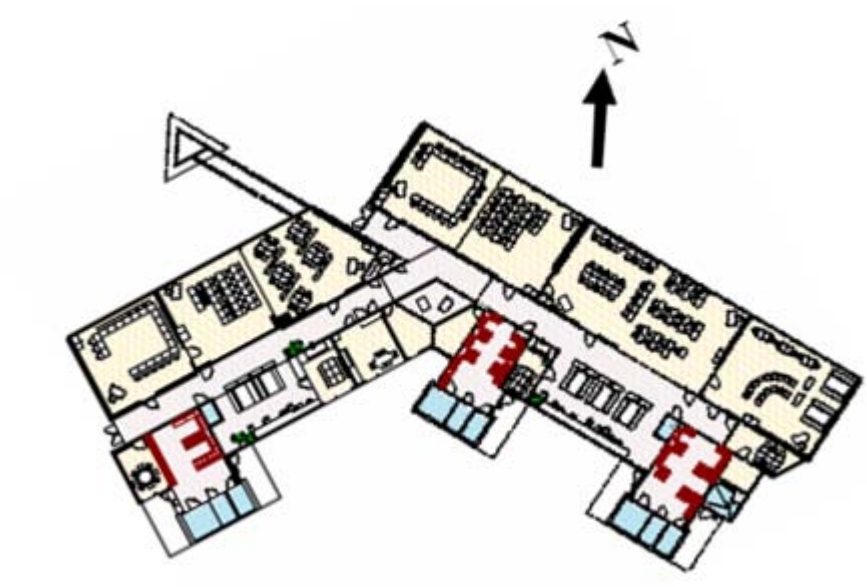
$$\Delta U = \pm \sqrt{\left(\frac{(T_{si} - T_{su})}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})^2} \cdot \Delta T_{inne}\right)^2 + \left(\frac{T_{inne} - T_{si}}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})^2} \cdot \Delta T_{su}\right)^2 + \left(\frac{-1}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})} \cdot \Delta T_{si}\right)^2 + \left(\frac{(T_{si} - T_i)}{R_{si}^2 \cdot (T_{inne} - T_{su})} \cdot \Delta R_{si}\right)^2}$$

(ligning 4-3)

På grunn av usikkerheten i R_{si}, vil resultatene i beregning av U-verdi fra ligning 3-1 bare gi et omtrentlig resultat, selv om alle temperaturene måles nøyaktig.(29)

5 Mediå barneskole på Grong

Skolen ble bygget i 1998. Målet var å redusere forbruket av elektrisk energi. Det forventede målte årlige energiforbruket var på rundt 70 kWh/m^2, mens det endte med å bli på rundt 200 kWh/ m^2.(44)



Figur 5.1 Skisse av 1.etasje. Toalettene i utbyggene er farget lyseblå på tegningen.

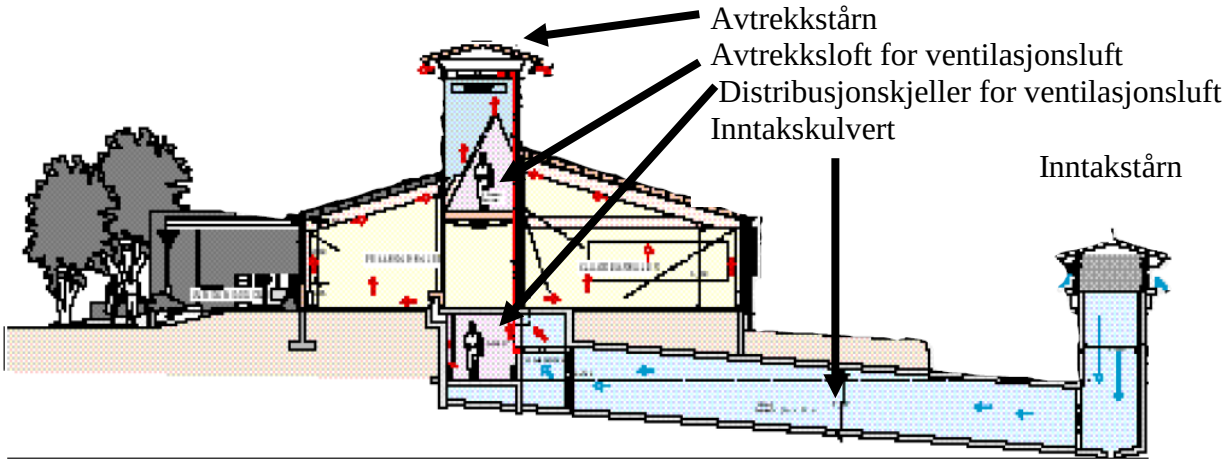
Figur 5.2 Bilde av skolen med de hvite toalett-utbyggene.

5.1 Bygningskonstruksjonen ved skolen

I beskrivelsen av oppbygningen er det tatt utgangspunkt i at skolen ble bygget slik som tilgjengelige arkitektstegninger og anbudsdokumenter oppgir. I følge professor Per Olaf Tjelflaat(45), som designet ventilasjonsanlegget, ble ikke arkitekttegningene fulgt nøyaktig under bygging, noe som trolig førte til flere kuldebroer. Det var ikke mulig å komme i kontakt med de som utførte snekkerarbeidet, siden firmaet var gått konkurs.

5.1.1 Ventilasjonssystemet

Målet ved designet av skolebygningen var å skape et godt inneklima og samtidig holde et lavt energiforbruk. Bygget har hydrid ventilasjon, noe som betyr at så lenge vind og oppdriftskrefter gir tilstrekkelig drivtrykk er vifter avslått. Energiforbruket er redusert som følge av behovsstyrt ventilasjon og energiovervåkning-system(EOS).



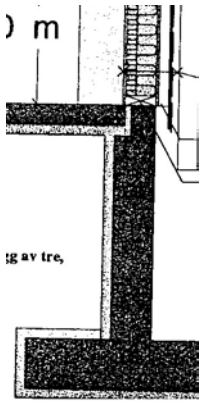
Figur 5.1.1 Skisse av ventilasjonsluftens bevegelse gjennom skolen.(46)

Energiforbruket til kjøling og oppvarming av ventilasjonsluft blir redusert ved at inntaksluften avgir eller tar opp varme fra betongveggene i inntakskulverten(figur 5.1.1). Inntakskulverten har stor termisk masse for å holde en jevn tilluftstemperatur. Kulverten har en bredde på 1,5 meter og en høyde på 2 meter. Lengden er ca. 15 m og gulvarealet er ca. 22,5 m^2.(47) Veggene er bygget opp av 15 cm betong isolert med 5 cm EPS. Distribusjonskjelleren for ventilasjonsluft har en bredde på 2,2 meter, høyde på 2 meter og et gulvareal på ca. 147 m^2. Gulvet er bygget opp av 10 cm betong og har ingen isolasjon.(48-49) Gulvarealet på avtrekksloftet er 147 m^2, det samme som gulvarealet i distribusjonskjelleren.(47)

For å gjenvinne noe av varmen fra avtrekksluften i perioder med oppvarmingsbehov, er det montert en væskekoblet gjenvinner. Varmevekslerne for gjenvinneren sitter i avtrekkstårnet og ved inntaket for ventilasjonsluft til distribusjonskjelleren. I tillegg er det montert et varmebatteri som sørger for ekstra oppvarming av ventilasjonsluften dersom ikke varmen fra gjenvinneren er tilstrekkelig.

CO_2- og temperatursensorer sørger for behovsstyrt ventilasjon. Settpunktet for CO_2 er 800 ppm.(50) Når verdiene er innenfor settpunktene slås viftene av, slik at ventilasjonen kun drives av vind og oppdriftskrefter.

5.1.2 Ytterveggene av tre i klasserommene



I klasserommene er det limtresøyler med dim. 140x250mm og lengde 2,2m som støtter limtredragerne som bærer taket. Ytterveggene av tre i klasserommene har utvendig luftet kledning. Innenfor kledningen er det en 12mm tykk utvendig gipsplate. Som bindeverk for kledningen er det 48x98mm trestendere. Veggene er isolert med 100mm Rockwool A-plater. Deretter er det innvendige utforinger av tre på 48x48mm som er isolert med 50mm mineralullmatter. Innvendig er det en gipsplate på 12mm. Ringmuren er isolert mot grunnen på innsiden og under med 5 cm EPS.(figur 5.1.2) Ringmurs-isolasjonen er forlenget horisontalt 1 m ut fra bygget.(51-55)

Figur 5.1.2 Arkitekttegning av ringmur og overgang mellom ringmur og yttervegg. (51)

Mellom treveggen og ringmuren er det er bunnsvill på 48x148mm på laftevatt og grunnmurspapp. Mellom ringmuren og gulvet av betong er det en kuldebrobryter på kun 2,5

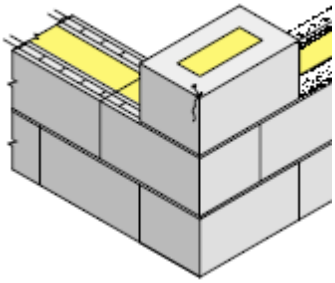
cm isolasjon(figur 5.1.2). Det gjør det sannsynlig at det blir et varmetap ut i ringmuren fra gulvet.(51)

5.1.3 Gulvet i klasserommene

Mens taket og veggene er relativt godt isolert er gulvet bare isolert med 5 cm EPS. Ellers består gulvet mot grunn av et betonglag på 10 cm og et gulvbelegg av PVC på 3mm.(49, 56).

5.1.4 Toalettveggene

Toalettveggene er i følge anbudsdokumentene bygget opp av 25 cm Leca-isoblokk.(57) Arkitekten Kåre Herstad mener imidlertid at det ble benyttet 30 cm Leca-isoblokk med murpuss på begge sider.(58) En 30 cm Leca-isoblokk kan i følge dokumentasjonen oppnå en U-verdi på 0,21 W/m^2K. Det forutsetter imidlertid riktig utførelse med bruk av laftevatt i fugene. Uten laftevatt og det anbefalte murmørtelet vil U-verdien i beste fall bli 0,28 W/m^2K, noe som i følge tabell 5.2.3 akkurat tilfredsstiller kravet i TEK1987. (59). Men siden Leca-betongen i utgangspunktet er luftåpen, er det fare for at U-verdien kan bli høyere som følge av infiltrasjon, dersom ikke porene i betongen tettes ordentlig med puss eller mørtel.



Figur 5.1.3 Leca iso-blokk(60)

5.1.5 Taket på toalettene

Taket er bygget opp med Rockwool Takfall på flate dekker av bærende stålplater. Deretter er det lagt 150 mm Rockwool Underlagsplate Pluss og 50 mm Rockwool Takplate Pluss dekket med armert PVC-folie på 1,2 mm.(61)

5.2 Tidligere undersøkelser av energiforbruket ved skolen

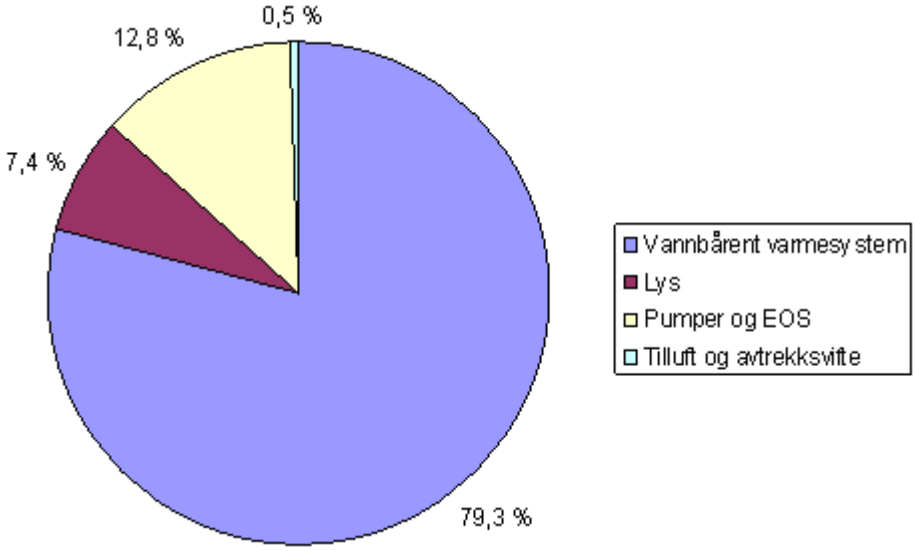
Bjørn Jenssen Wachenfeldt leverte i 2003 en doktoravhandling med tittelen ”Natural Ventilation in Buildings – Detailed Prediction of Energy Performance”(1). I doktoravhandlingen laget han en modell som simulerte energibruken på Grong barneskole. Modellen ble laget i energiberegningsprogrammet ESP-r og inneholdt blant annet varmeoverføring, intern luftstrøm og vannbårent oppvarmingssystem.(62) Et av hovedfunnene var at kuldebroer økte varmebehovet fra det vannbårne varmesystemet med hele 40 %, sammenlignet merd tilsvarende bygg uten kuldebroer. Kuldebroene ble funnet langs gulvlistene og taklistene, i hjørnene, ved stendere og i reisverket i veggene.(63)

Det er mistenkt infiltrasjon fra ytterdørene, selv om de er stengt. I tillegg er det mistenk en liten infiltrasjon mellom betongsålen og tømmerveggen, noe som fort kan være tilfelle dersom det ikke er tettet med grunnmurspapp(figur 2.2.1). Infiltrasjon i bygget som helhet ved 50 Pa trykkdifferanse er overslagsmessig beregnet til å være rundt $0{,}83h^{-1}$.(64) Det er godt innenfor kravet i TEK2007, som sier at lufttettheten skal være mindre enn 1,5 h^{-1}.

42 % av ytterveggene mot nord i klasserommene består av vinduer(figur 5.1), noe som reduserer veggens gjennomsnittlige samlede U-verdi.(65)

5.2.1 Energibruk

Energiforbruket ved skolen ble målt fra mars til mai og fra september til desember i 2002. Resultatene er gjengitt i figur 5.2.1. Det er forventet av det vannbårne varmesystemet står for en enda større andel av energiforbruket i de kaldeste månedene i året.



Figur 5.2.1 Målt energibruk ved Grong barneskole(66)

Energiforbruket pr. m^2 er høyest på toalettene og garderobeområdene som stikker ut fra resten av bygget og derfor har stor yttervegg-overflate. (67) Det er et generelt problem ved designet av bygget at overflatearealet av ytterveggene er stort i forhold til volumet av bygget. I tillegg øker den komplekse geometrier sjansen for at det oppstår kuldebroer.(68)

Selv om dagslystilgangen i bygget er god, viser undersøkelsene at energiforbruket til lys ikke er redusert så mye som man hadde håpet på, fordi lyset stort sett blir slått på ved starten av skoledagen og slått av på slutten av dagen(68-69)

Det er også antatt at åpning av ytterdører og vinduer fører til økt energibruk.(56)

5.2.2 Ventilasjonssystemet

En positiv oppdagelsen var at det naturlige ventilasjonssystemet førte til at varmebehovet for ventilasjonsluft ble redusert med 6 % i forhold til om skolen hadde hatt mekanisk CAV-ventilasjon.(70)

Wachenfeldts simuleringer viser at over 50 % av energibehovet til oppvarming av ventilasjonsluft blir dekket gjennom varmegjenvinning i mai og september, siden avtrekksluften tar opp varme fra solen i avtrekkskammeret. I de kaldere vintermånedene er effektiviteten imidlertid lav, siden gjenvinneren er slått av om natten og avtrekkskammeret for ventilasjonsluften nedkjøles som følge av kontakt med det kalde vindusglasset på avtrekksloftet.(56) Det er beregnet av den gjennomsnittlige virkningsgraden til varmegjenvinneren kun er 36 % når den ikke går om natten og energibruken til pumper neglisjeres. Det er lavt, med tanke på at moderne roterende varmegjenvinnere har en årsvarmevirkningsgrad på rundt 70 %.(71) Totalt sett står oppvarmingen av ventilasjonsluft for 26 % av energiforbruket i simuleringsperioden.(67)

Mangelfull informasjon om vindforholdene førte til at ventilasjonssystemet i hovedsak ble basert på termisk oppdrift.(68) Ved bedre overvåkning av luftstrømmen gjennom ventilasjonsanlegget og samkjøring med bygningens energioppfølgingssystem kunne energibruken til ventilasjon ha vært redusert. Problemet er at tradisjonelt overvåkningsutstyr for ventilasjonssystemer er beregnet for større trykkdifferanser og lufthastigheter.(72) Hvis EOS-systemet kunne utnyttet at oppdriftskreftene er sterkere om vinteren enn om våren på grunn av økt temperaturforskjell mellom inne og ute, kunne det blitt mindre forskjell i den tilførte luftmengden om natten over året.(73)

5.2.3 Sensitivitetsanalyse

Wachenfeldts sensitivitetsanalyse(tabell 5.2.1) viste at det var mulig å redusere energiforbruket ved skolen med 10 % dersom ventilasjonen ble slått av utenom skoletiden. Likevel anbefalte ikke Wachenfeldt å slå av ventilasjonen om natten, av fare for at det kunne føre til dårlig luftkvalitet i bygget.

Dårlig styring fører også til økt energiforbruk til varmebatteriet for ventilasjonsluften. Hvis varmebatteriet og gulvvarmen hadde vært bedre regulert, kunne energiforbruket vært redusert med 5,5 %.

Wachenfeldt viste at et enkelt tiltak som å slå på varmegjenvinneren om natten, kunne redusert energiforbruket med 4,2 %. Varmegjenvinneren er nå på om natten.(74)

Simuleringen som beregner at energiforbruket kunne vært redusert med 9,4 % dersom isolasjonstykkelsen i gulvene hadde vært økt fra 5 til 15 cm, bekrefter at gulvene burde vært bedre isolert.

Tabell 5.2.1 Sensitivitetsanalyse fra 9-17 november 2002 over alternative systemer som reduserer energiforbruket(70)

Tiltak	Reduksjon i energibehovet
Ventilasjonen slås av fra 17.00-07.00 på hverdagene og hele helgen	10 %
Ideell styring av gulvvarmen og oppvarmingen av ventilasjonsluften	5,5 %
Varmegjenvinneren slås på om natten	4,2 %
Øke isolasjonstykkelsen i gulvene på skolen, i kjellergulvet og kjellerveggene fra 5 til 15 cm	9,4 %

5.2.4 U-verdiene for de ulike bygningsdelene

Dersom isolasjonstykkelsen i modellen ble redusert med 70 % i veggene, taket og dørene stemte det målte varmetapet godt med det beregnede varmetapet. Ved å beregne bygningsdelenes U-verdi ut fra en redusere isolasjonstykkelse anslo Wachenfeldt de faktiske U-verdiene inkludert kuldebroer. De beregnede U-verdiene inkludert kuldebroer, som er gjengitt i tabell 5.2.2, tilfredsstiller på ingen måte byggeforskriftene. Det kunne lett ha vært kontrollert ut ligning 2-1 før byggefasen, siden Byggforskblad 471.016-17 angir kuldebroverdier for typiske bygningskonstruksjoner. En slik beregning gjort at Wachenfeldt viser at U-verdien for ytterveggen blir rundt 0,45 W/m^2K.(75) Det samsvarer godt med den anslåtte U-verdiene for yttervegg i tabell 5.2.2, som Wachenfeldt har beregnet ut fra byggets energiforbruk.

Omkretsen av alle hjørnene, endene og koblingene mellom indre og ytre vegger er 740 m. Omkretsen av alle vinduene er 780 m. Totalt er det 1,5 km der det er fare for kuldebroer.(30)

Tabell 5.2.2 Gjennomsnittlige beregnede U-verdier i W/m^{2}K for ulike bygningsdeler(65)

	U-verdi uten kuldebroer	U-verdi med kuldebroer*
Yttervegg klasserom, tre	0,19	0,52
Yttervegg klasserom, murstein	0,19	0,50
Yttervegg WC	0,27	0,62
Tak	0,19	0,50
Ytterdører	0,66	1,73

* forutsatt at isolasjonstykkelsen reduseres med 70 % som i modellen.

Bygningen ble reist i 1998, men ble designet etter byggeforskriften fra 1987. Selv om U-verdiene uten kuldebroer ville ligget godt under minstekravet i byggeforskriftene fra 1987(tabell 5.2.3), endte de opp med å ligge godt over kravet, ettersom de ble 2-3 ganger høyere enn antatt.

Tabell 5.2.3 Krav til U-verdier i W/m^{2}K i byggeforskriftene fra 1987, 1997 og 2007(76-78)

	1987	1997	2007
Vindu	2,4	1,6	1,2
Dør	2,0	1,6	1,2
Yttervegg	0,30	0,22	0,18
Tak	0,20	0,15	0,13
Gulv mot grunn	0,30	0,15	0,15

5.2.5 Varmetap til grunnen

Gulvet er et svakt punkt og bygget taper mye varme til grunnen. Et grovt overslag anslår at varmetapet til grunnen er i størrelsesordenen 80 kWh/m^{2}år.(44) Det er mye, med tanke på at skolens totale årlige energiforbruk er på litt under 200 kWh/m^{2}år.(44) Varmetapet er ekstra stort i garderobene, toalettene og det ene klasserommet som har vannbåren oppvarming nedlagt i betonglaget.(56) Målinger viser at gulvtemperaturen ligger på rundt 20 °C i gjennomsnitt, men det er opptil 3 °C forskjell mellom de sentrale delene av gulvet og 0,2 m fra veggen.(79)

5.2.6 Pumper og EOS

Det er mistanke om at det er et høyt energibruk til de tre pumpene i varmesystemet.(80). Tabell 5.2.4 viser hvilke pumper og vifter som er installert på skolen.

Tabell 5.2.4 Effektforbruket til pumper og vifter(80)

	Maks effekt	Kommentar
Sirkulasjonspumpe for gulvvarme	1100W	Frekvensstyrt
Sirkulasjonspumpe for radiatorkrets	250W	2 hastighetsnivåer
Pumpe for varmegjenvinner	245W	3 hastighetsnivåer
Pumpe til vannbåren varme for oppvarming av ventilasjonsluft	250W	2 hastighetsnivåer
Tilluftsvifte	750W	Frekvensstyrt
Avtrekksvifte	750W	Frekvensstyrt
Toalettvifter	500W	En hastighet
Totalt	**3845W**	

Effektforbruket til sirkulasjonspumpen for gulvvarme er svært høyt i forhold til effektforbruket til sirkulasjonspumpen for radiatorkretsen. Dersom det er nødvendig med så stort effektforbruk for å få tilstrekkelig sirkulasjon gjennom rørene, burde det vært brukt en større dimensjon på rørene til gulvvarmen.

Energiforbruket til pumper og EOS er overslagsmessig beregnet til å være rundt $24\ \mathrm{kWh/m^2 \cdot år}$.(44) Siden skolen har et gulvareal på 1000 m^2 i 1.etasje, tilsvarer det et gjennomsnittlig effektforbruk på 2,7 kW.(81) Det tyder på at EOS-systemet har et gjennomsnittlig effektforbruk på over 800 W, med tanke på at maksimalt effektforbruk for pumpene er på 1845 W.

Wachenfeldt har målt det elektriske effektforbruket ved skolen fra 9-17 november 2002 til å være rundt 3 kW om natten. Han skriver at alle pumpene unntatt sirkulasjonspumpen til varmegjenvinneren går hele tiden.(82)

En annen måling som ble gjort av Tjelflaat i februar 2001 viste at elektriske effektforbruket var 3,5 kW utenfor driftstiden.(83) All belysning og alle ventilasjonsvifter skal ha vært avslått på dette tidspunktet.

Wachenfeldt skriver at målinger han har gjort om sommeren viser at pumpen til gulvvarme går på tilnærmet maks effekt hele tiden, med et effektforbruk på 1,1 kW(tabell 5.2.4). Sirkulasjonspumpene til radiatorene og varmegjenvinneren er slått av i denne perioden.(84) Utenom driftstiden har Wachenfeldt målt det elektriske effektforbruket til rundt 1,5-2 kW i en 8-dagers periode i juni.(84) Siden ventilasjonsviftene trolig går på lav effekt utenom driftstiden, blir effektforbruket til EOS maksimalt 0,4-0,9 kW i denne perioden.

5.2.7 Varmetap fra tilluft til kjellervegger

Varmetapet fra tilluften til veggene i distribusjons-kjelleren er relativt stabilt på rundt 1kW, med et maksimum på 2kW. Effekttapet er imidlertid større hvis man legger til varmetapet som følge av konduksjon gjennom taket fra gangen på skolen.(85)

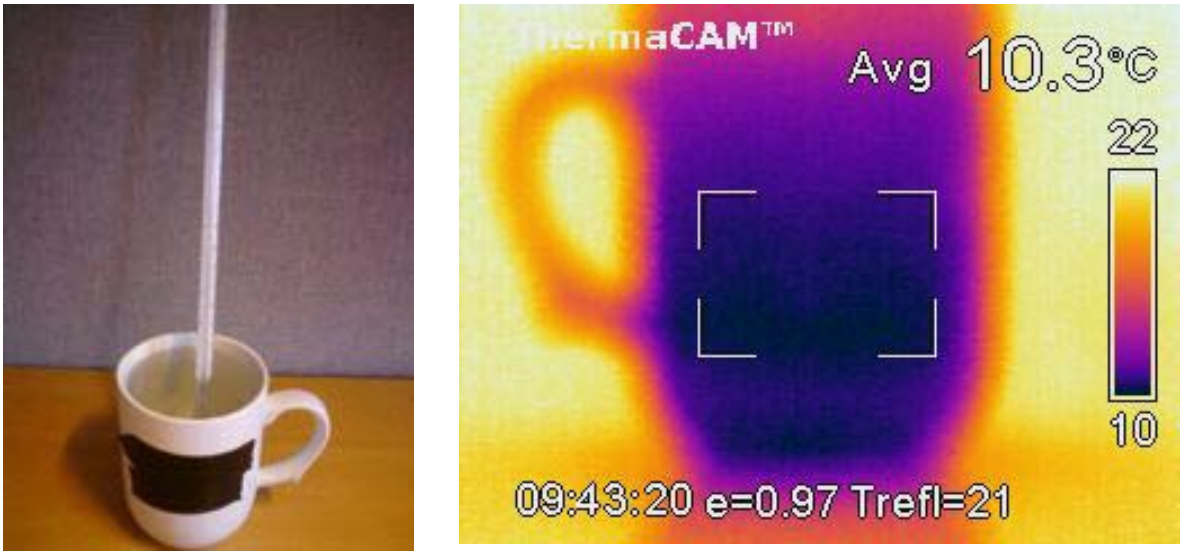
5.3 Eksisterende tiltak for å spare energi i bygget

- Barna på skolen bruker innesko slik at forurensinger i minst mulig grad tilføres bygget.
- Det er brukt lavemitterende materialer, slik at nødvendig tilført luftmengde er redusert.(86)
- Det brukes energisparende belysning.(87)

I tillegg var det planlagt å redusere energiforbruket til belysning gjennom lysstyring, siden klasserommene har rik tilgang på dagslys. Lysstyringssystem ble imidlertid for dyrt i investering.

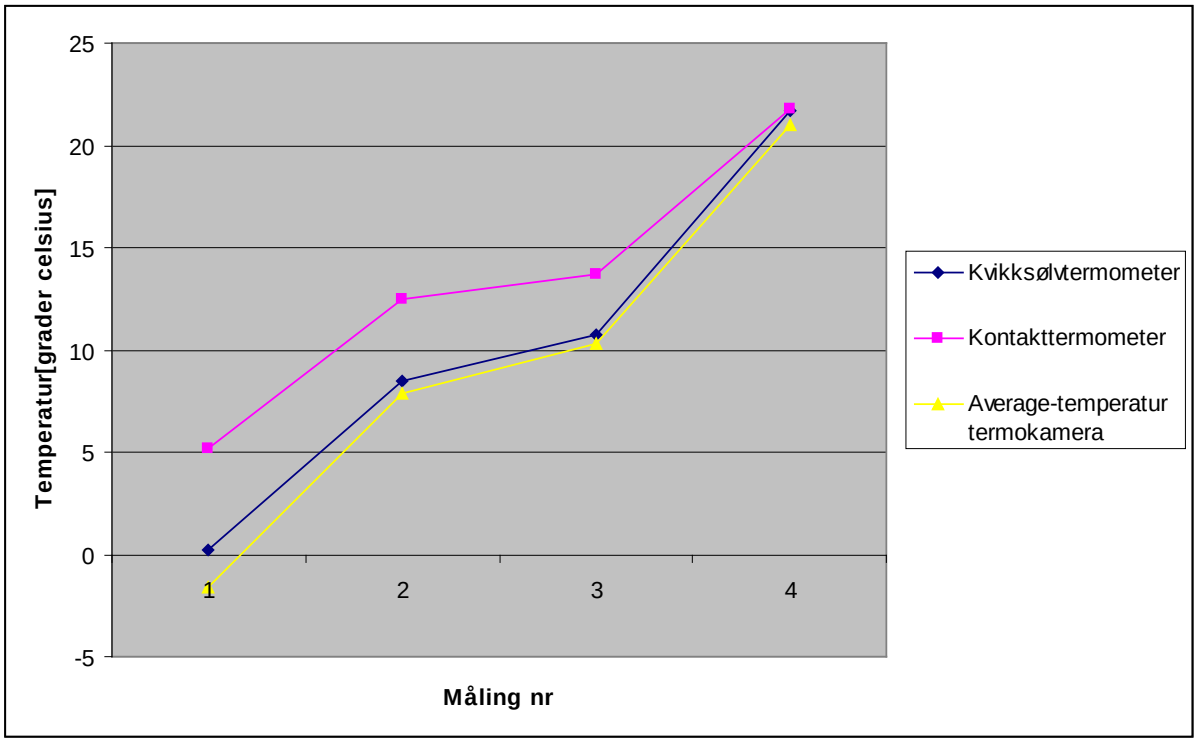
6 Kalibrering av termografi-kameraets temperaturmålinger

For å undersøke nøyaktigheten til termografikameraet ble overflatetemperaturen til en kopp fylt med vann kontrollert mot målingene fra et kontakttermometer. Målingene ble sammenlignet mot vannets temperatur som ble målt med et kvikksølvtermometer. Koppen ble påført svart tape med kjent emissivitet 0,97(figur 6.1).



Figur 6.1 Kontroll av kameraets temperaturmåling mot overflate med kjent temperatur.

Resultatene fra målingene er gjengitt i figur 6.1 og i tabell 1 i kapittel V2 i vedlegget. Årsaken til at det er ønskelig å finne en sammenheng mellom kameraets temperaturturmåling og andre temperaturmålere, er at det er ønskelig å ha mist mulig feil i temperaturmålingene ved beregningen av U-verdier.



Figur 6.2 Kalibrering av termografi-kameraets temperaturmålinger

Kvikksølvtermometeret fikk stå flere minutter i vannet i forkant av hver temperaturmåling, slik at termometerets avleste temperatur og koppens overflatetemperatur skulle stabilisere seg. Temperaturen til væsken og overflatetemperaturen til koppen antas derfor å være lik under målingene. Resultatene i figur 6.2 viser at kontakttermometeret viser for høye temperaturer. Siden feilen synker mot null når overflatetemperaturen er lik romtemperaturen på rundt 21 °C, tyder det på at kontakttermometerets temperatursensor ikke er isolert godt nok, slik at den påvirkes av lufttemperaturen. Det virker sannsynlig ut fra utformingen av sensoren, som er en metalltråd mot går rundt staven på temperaturmåleren(bildet til høyre). Derfor avtar kontakttermometerets nøyaktighet etter hvert som forskjellen mellom lufttemperaturen og overflatetemperaturen øker.

Termografi-kameraet viser gjennomgående noe lavere temperatur enn kvikksølvtermometeret. Det skyldes trolig at kameraet ikke er kalibrert siden 2003. I lappen som står under batteriet i kameraet opplyses det opp at kameraet skulle vært kalibrert i 2004, så det virker som kameraet helst skulle vært kalibrert årlig. Det var rimelig å forvente av overflatetemperaturen til koppen var lik eller høyere enn vanntemperaturen, siden strålingsutveksling med rommet og varmeledning fra romluften til koppen kunne ført til at overflatetemperaturen var noe høyere enn væsketemperaturen. Siden termografi-kameraet viser lavere temperatur enn vanntemperaturen, viser kameraet for lav temperatur.

Et annet forsøk for å sammenligne målingene med kontakttermometeret og termografikameraet ble gjort utendørs to ulike dager. Resultatene er vist i tabell 6.1.

Tabell 6.1 Sammenligning mellom temperaturålingene fra kontakttermometeret og termografikameraet

Materiale	Måling Nummer	Lufttemperatur	Kontakt-termometer	Average-temperatur termokamera
Mur	1	3,3	3,3	0,3
Mur	2	6,3	10,3	8,4
Tre	3	3,3	2,0	1,1
Tre	4	6,3	5,8	3,8

Kontakttermometeret viser nå trolig riktig veggtemperatur, siden feilkilden som skyldtes stort avvik mellom lufttemperatur og veggtemperatur er borte. Veggtemperaturen ute burde være høyere eller lik lufttemperaturen, med mindre raske endringer i utetemperaturen har gjort at veggen på grunn av sin store varmekapasitet ikke har tilpasset seg utetemperaturen. På de tidspunktene målingene ble tatt midt på dagen i skyggen var lufttemperaturen stabil, slik at veggtemperaturen burde ligget nær lufttemperaturen. Sammen med resultatene fra figur 6.2 indikerer det at termografi-kameraet viser for lav temperatur.

Det er tydelig ut fra resultatene i tabell 6.1 at termografi-kameraet viser gjennomgående lavere temperaturer enn kontakttermometeret.

I måling 1 er det overraskende at termografikameraet indikerer at veggens overflatetemperatur er lavere enn lufttemperaturen. Dersom ikke veggen har blitt nedkjølt gjennom strålingsutveksling med himmelen, tyder målingen på at termografi-kameraet viser 3 °C for lav temperatur i dette tilfellet. Veggen var ikke fuktig, så den kan ikke ha blitt nedkjølt ved at vann har fordampet.

Måling 2 samsvarer mer med forventningene. Veggtemperaturen er noe høyere enn lufttemperaturen, trolig på grunn av konduksjon gjennom treveggen. Hvis kontakttermometeret viser riktig temperatur, viser termografi-kameraet 2 °C for lav temperatur.

I måling 3 viser både termografi-kameraet og kontakttermometeret at veggens temperatur er under lufttemperaturen. Det er overraskende, siden treveggens temperatur var forventet å være varmere eller lik lufttemperaturen. Årsaken kan være at det ble gjort en målefeil med kontakttermometeret. Men det kan også skyldes at veggen har vært fuktig og har avgitt varme til å fordampe vann, siden det regnet. Termografikameraet viser 1 °C lavere temperatur enn kontakttermometeret.

I måling 4 viser termografi-kameraet 2 °C lavere enn kontakttermometeret. De 8 målingene gjengitt i figur 6.2 og tabell 6.1 indikerer at temperaturmålingene fra termografi-kameraet blir i gjennomsnitt 1,4 °C for lav.

Figur 6.3 viser temperaturmålingene av murveggen. Både murveggen og treveggen ble påført svart tape med kjent emissivitet, som vist i figur 6.4. Termografi-kameraet ble stilt inn til å gjøre gjennomsnittlige temperaturmålinger innenfor de firkantede område som er markert i varmebildene på figur 6.3-4.

Figur 6.3 Kontaktmåling og termogram av murvegg med svart tape

Figur 6.4 Kontaktmåling og termogram av trevegg med svart tape

7 Termografering av Grong barneskole

Grong barneskole ble besøkt tre ganger i løpet av våren 2010. Bortsett fra ytterdørene, ble det ikke oppdaget noen åpenbare kuldebroer ved utvendig termografering. Wachenfeldts mente at det var kuldebroer i reisverket i veggene, men det ble ikke oppdaget, bortsett fra nederst på veggstolpene i klasserommene. Det ble heller ikke oppdaget kuldebroer langs taklistene og gulvlistene i klasserommene, bortsett fra i noen hjørner. Toalettene var de kaldeste rommene i bygget. Derfor ble de viet størst oppmerksomhet under termograferingen.

7.1 Trykket i bygget

Termograferingen ble utført uten å trykksette bygget, men det kan antas at ventilasjonsanlegget skaper et svakt undertrykk inne i forhold til ute.

Det ble gjort en trykkmåling for å se hvor stort undertrykk det var mulig å skape i klasserommet dersom ventilasjonsanleggets tilluftsvifte ble slått av og avtrekksviften ble kjørt på fullt. Håper var at det skulle være mulig å skape en så stor trykkforskjell at eventuelle luftlekkasjer ville bli kraftig forsterket. Da hadde det vært lettere å avsløre dem med termografi-kameraet. Trykket ble målt med en elektronisk trykkmåler ved å føre en gummislange ut gjennom vinduet(figur 7.1). Slangens ende pekte nedover, slik at trykkmålingene ikke skulle bli påvirket av vind. Likevel virket det som vinden påvirket trykkmålingen, siden det avleste trykket varierte mellom 0 og 10 Pa. For å få skapt større undertrykk burde tillufts-tilførselen vært forseglet. Det var en feilkilde at det ikke ble tettet helt mellom vinduet og slangen som stakk ut fra vinduer. Åpningen var imidlertid ikke stor, så den bør ikke ha påvirket trykkmålingen så mye. Vinduet ble lukket så mye som mulig, uten at slangen ble klemt sammen. Trykket ble da målt til 6 Pa, men usikkerheten er stor. Termograferingen viste ingen merkbare forskjeller i forhold til da ventilasjonen gikk som normalt. Derfor ble resten av bygget termografert uten å trykksette bygget. Normalt sett utføres termografering ved en trykkdifferanse på 50 Pa. Trykkdifferansen kan skapes ved å sette inn en kraftig vifte i en av ytterdørene i bygget.

Figur 7.1 Trykkmåler

7.2 Vær og temperaturer under termograferingen

Alle dagene da termograferingen ble utført var det lettskyet og ikke noe nedbør. Maksimal og minimal utetemperaturen i døgnet før og under termograferingen er gitt av tabellen 7.2.1. I tillegg er temperaturen ved start av termograferingen rundt kl. 12 og ved avslutning rundt kl. 18 angitt i tabell 7.2.2. Usikkerheten i målingene er på $\pm 0,5\,°C$ som følge av unøyaktig avlesning av kurvediagram i EOS-loggen. Med laveste målte lufttemperatur inne på 12 °C under termograferingen 01.02 og 22.02 viser utetemperaturene at det var minst 10 graders temperaturforskjell mellom inne og ute i døgnet før termografering og minst 15 graders temperaturforskjell mellom inne og ute under termograferingen, så kravene i metoden i kapittel 1.2 er oppfylt. 17.03 var laveste målte innetemperatur 16 °C, så temperaturforskjellen mellom ute og inne er under termografering er nede i 12 °C. Utetemperaturen var relativt stabil alle dagene, og temperaturmålingene før og etter termografering tyder på at det var under 5 °C variasjon i utetemperaturen under termografering.

Tabell 7.2.1 Minimal og maksimal lufttemperatur ute

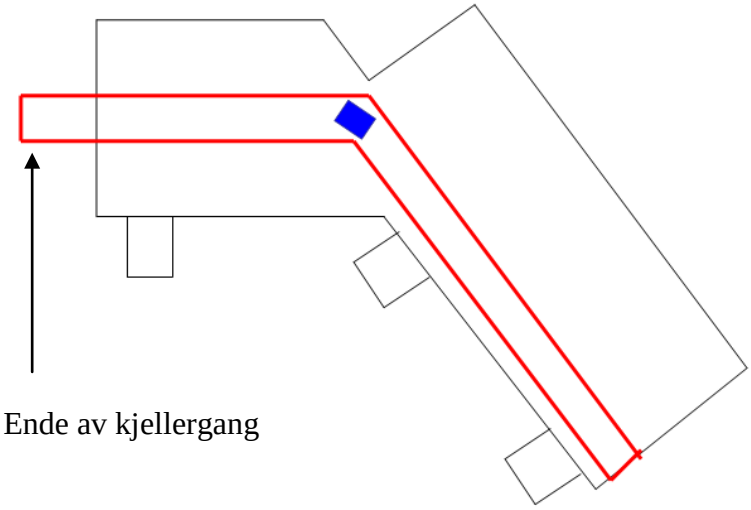
	31.01	01.02	21.2	22.2	16.03	17.03
Min	-15,7 °C	-17,6 °C	-14,5 °C	-21,5 °C	-2,5 °C	-4 °C
Maks	-12,5 °C	-10,2 °C	-10,0 °C	-14,0 °C	4,5 °C	-2 °C

Tabell 7.2.2 Utetemperaturer under termograferingen

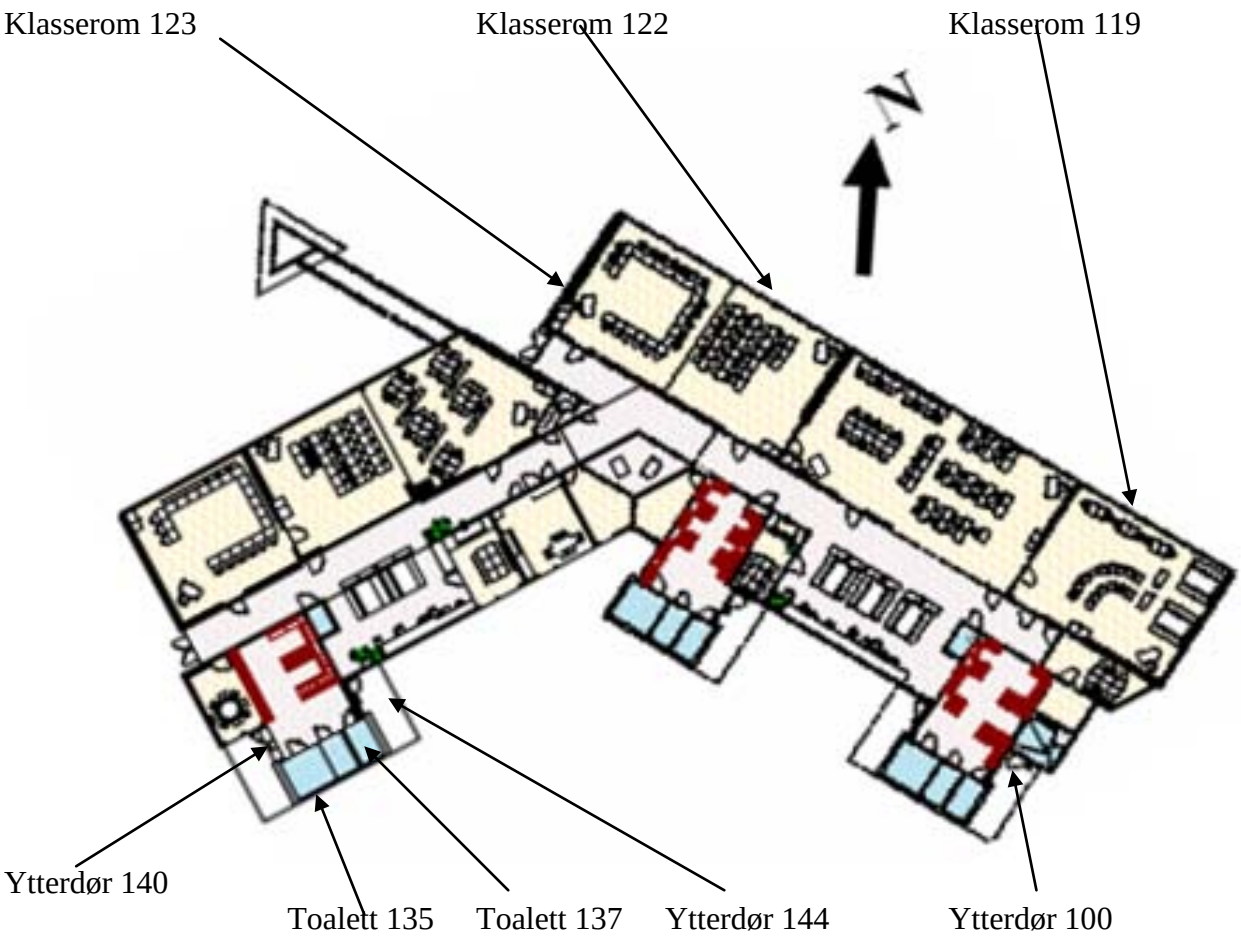
	01.02	22.2	17.03
Kl. 12.00	-12,0 °C	-14,0 °C	4,0 °C
Kl. 15.00	-14,5 °C (kl 16.30)	-	1 °C
Kl. 18.00	-13,5 °C	-17,0 °C	1,5 °C

Min personlige opplevelse var at det var tilnærmet vindstille alle dagene termograferingen ble utført. Dermed er kravet i standarden for termografering om under 6 m/s vindstyrke oppfylt. Vindretningene var i følge EOS-loggen østlig 01.02 og 22.02 og sørvestlig 17.03.

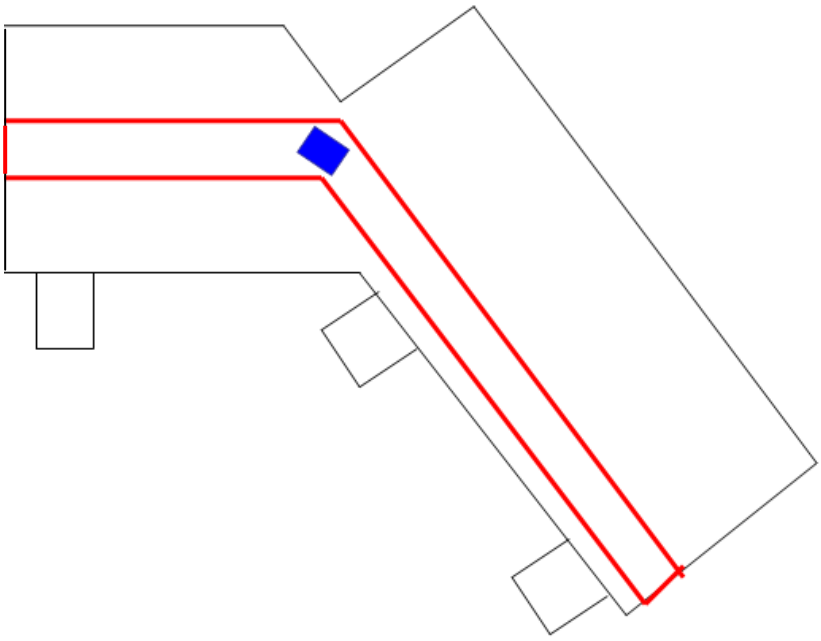
For å få en oversikt over hvilke rom i bygget som er termografert, er det vist 3 skisser av bygget: Kjelleren(figur 7.2.1), 1.etasje(figur 7.2.2) og avtrekksloftet(figur 7.2.3).



Figur 7.2.1 Skisse over kjellergangen(rød) og tillufts-tilførselen der(blå). Kjellergangen er under korridorene på skolen.



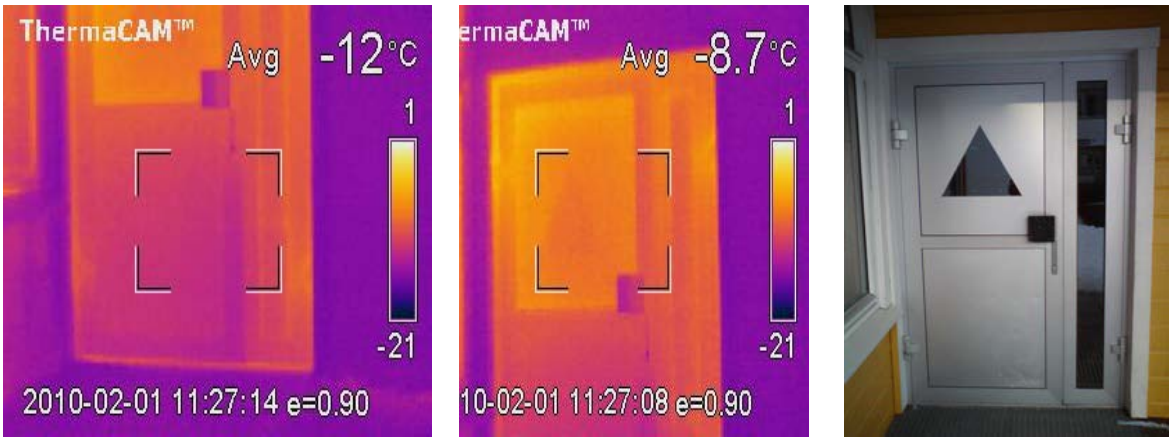
Figur 7.2.2 **Skisse over 1.etasje på skolen og rommene som ble termografert.**



Figur 7.2.3 **Skisse over loftsgang(rød) og avtrekkstårnet der(blå). Loftsgangen er over korridorene på skolen.**

7.3 Dørene

Dørene har en overflate av metall og virker å være en kuldebro. Mens utetemperaturen under termograferingen 01.02.2010 var -12 °C, viser varmebildene i figur 7.3.1 at veggtemperaturen ute rundt døren var ca. -15 °C. Det tyder på at termografikameraet viser for lav temperatur, siden ytterveggen burde vært varmere eller hatt samme temperatur som utetemperaturen. Den utvendige temperaturen på dørene var mellom -5 og -12 °C.(figur 7.3.1). Korrigert for at termografi-kameraet viser gjennomsnittlig 1,4 °C for lav temperatur, betyr det at den utvendige temperaturen til døren er mellom -4 og -11 °C. Døren er vesentlig varmere enn veggene rundt. Særlig avgir den øvre halvdelen av døren mye varme til uteluften.(figur 7.3.1)



Figur 7.3.1 Ytterdør 140 sett utenfra. Bredden på temperaturskalaen er justert manuelt. (01.02, -12 °C).

En annen dag ble det gjort en ny undersøkelse av den samme ytterdøren. Det ble både gjort kontaktmålinger og tatt varmebilder. Lufttemperaturen ute var 1 °C. Kontaktmålingene gav en gjennomsnittlige innvendige temperatur på 16 °C(tabell 7.3.1) og en gjennomsnittlig utvendig temperatur på 8 °C(tabell 7.3.2). Det er tydelig at døren er kaldest nede langs dørkarmen, noe som trolig skyldes konduksjon fra bakken. Ut fra varmebildene ser det ut som kulden kommer nedenfra(figur 7.3.7 og 7.3.10).

Tabell 7.3.1 Innvendige overflatetemperaturer på ytterdør 140 målt med kontakttermometer De svarte prikkene på figuren viser hvor på døren målingene ble tatt. Plasseringen av prikkene samsvarer med plasseringen i tabellen. (17.03, 1 °C)

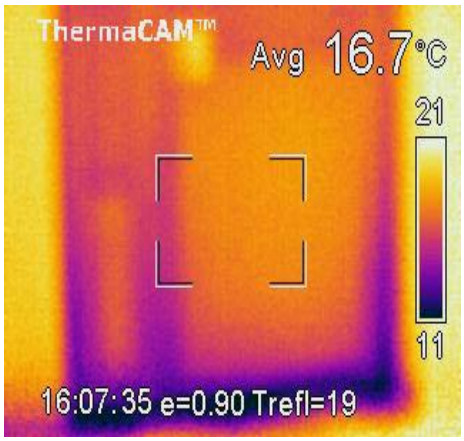
15	15,8	15,6	17,2		17,1		17
15,4	17,1			16,5	16,6	16,2	
15,8			17,1	16,5	17,7	16,4	16,6
16,5	17,3			16,4	17,3	16,3	16,9
			17,3	16,8	17,3	17,1	
15,6	16,7	16	15,7	17,5		17,6	16,1
14,4		15	15,5	17,2		17,1	14,3
12,5	14	14,2		13,3		13,4	13,6

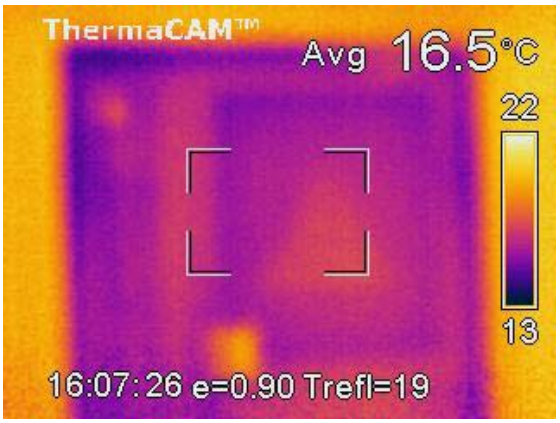
Den store forskjellen mellom lufttemperaturen ute og den utvendige overflatetemperaturen til døren viser at det er en klar varmestrøm ut gjennom døren. Siden kontakttermometeret påvirkes av lufttemperaturen, kan overflatetemperaturen utvendig på døren ha vært enda

høyere. Resultatene fra tabell 7.3.2 stemmer godt med figur 7.3.2 som viser at det er kaldest nede lang dørkarmen.

Tabell 7.3.2 Utvendige overflatetemperaturer på ytterdør 140 målt med kontakttermometer. De hvite prikkene på figuren viser hvor på døren målingene ble tatt. Plasseringen av prikkene samsvarer med plasseringen i tabellen. (17.03, 1 °C)

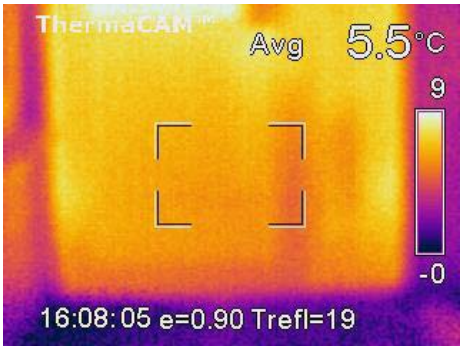
8,5		8,6				
8,5		10,1		8,5	8,8	9
	10,1	10,6	10,2	9		
8		9,8		7,3	8,7	8,4
7,1	7,3		7	6,7		
6,3	6,8		6,5	6,9	8,2	8
5,7	5,7		5,6			

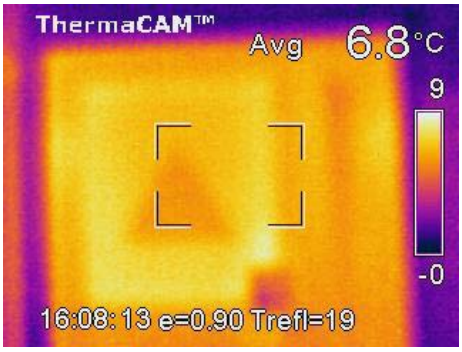




Figur 7.3.2 Nederste(venstre) og øverste del av ytterdør 140 sett fra innsiden med automatisk temperaturskala. (17.03, 1 °C)

Varmebildene av døren viste en gjennomsnittlig temperatur på 16,5 °C innvendig(figur 7.3.2) og 6 °C utvendig(figur 7.3.3). Korrigert for at kameraet viser i gjennomsnitt 1,4 °C for lav temperatur, gir det en utvendig overflatetemperatur på 7-8 °C og en innvendig overflatetemperatur på 17-18 °C. Det samsvarer godt med målingene fra kontakttermometeret. Den utvendige veggtemperaturen over døren er ca. 1 °C(figur 7.3.3)





Figur 7.3.3 Nederste(venstre) og øverste del av ytterdør 140 sett fra utsiden med automatisk temperaturskala. (17.03, 1 °C)

Det var forventet at emissiviteten til ytterdøren kunne vært betydelig lavere enn 0,90, siden døren er av metall. Men ut fra sammenligningen med temperaturmålingene fra kontakttermometeret, virker det som om temperaturmålingene ble riktige når emissiviteten ble satt til 0,90. Muligens skyldes det at metallet er nokså matt.

U-verdien til ytterdøren ble beregnet av Wachenfeldt til å være 1,73 W/m^{2}K (tabell 5.2.2), mens kravet i byggeforskriftene fra 1987 var 2,0 W/m^{2}K (tabell 5.2.3). U-verdien for døren beregnes til 1,9 W/m^{2}K etter ligning 3-1 på bakgrunn av temperaturmålingene. T_{si} settes til 17 °C (gjennomsnittsverdi for målingene med kontakttermometeret og termografikameraet) og T_{su} settes til 8 °C. Innetemperaturen antas å være 20 °C, som er settpunktet, siden den ikke ble målt. Den ble imidlertid målt til å være 18-19 °C en dag det var -14 °C ute, så siden det var 1 °C ute er det rimelig at lufttemperaturen inne var 20 °C, siden det er settpunktet for lufttemperaturen i garderoben.

$$U_{\text{ytterdør}} = \frac{T_{inne} - T_{si}}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})} = \frac{20-17}{0{,}13 \cdot (20-8)} = 1{,}9 \text{ W/m}^2\text{K} \qquad \text{(ligning 7-1)}$$

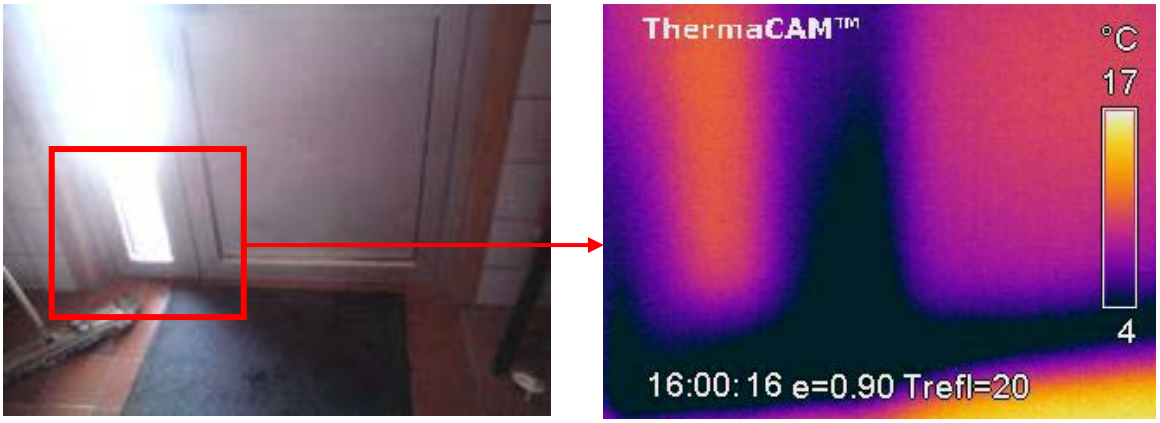
Resultatene stemmer godt med Wachenfeldts beregninger. Usikkerheten $\Delta U_{\text{ytterdør}}$ etter ligning 4-3 er $\pm 1{,}8$ W/m^{2}K . ΔT_{inne} settes til 2 siden den ikke ble målt, ΔT_{su} og ΔT_{si} settes til 0,5 siden T_{si} og T_{su} er basert på gjennomsnittsverdier av mange målinger og ΔR_{si} settes lik 0,10(se kapittel 4). $U_{\text{ytterdør}}$ er derfor i intervallet 0,1-3,7 W/m^{2}K . Den store usikkerheten skyldes usikkerheten i Rsi. Selv om usikkerheten i de andre størrelsene hadde vært lik null, ville usikkerheten i Rsi gjort at usikkerheten i $U_{\text{ytterdør}}$ var 1,5 W/m^{2}K .

Ytterdørene i en annen garderobe ble termografert en annen dag. Figur 7.3.4-7.3.10 viser at det er kaldt mellom dørene og dørkarmene, noe som enten kan skyldes infiltrasjon, konduksjon fra bakken utenfor eller at dørene er dårligere isolert her.

Figur 7.3.4 Nederst til høyre langs ytterdør 100 mot sør i rom 101 ”Grov garderobe”. 22.02(-14 °C)

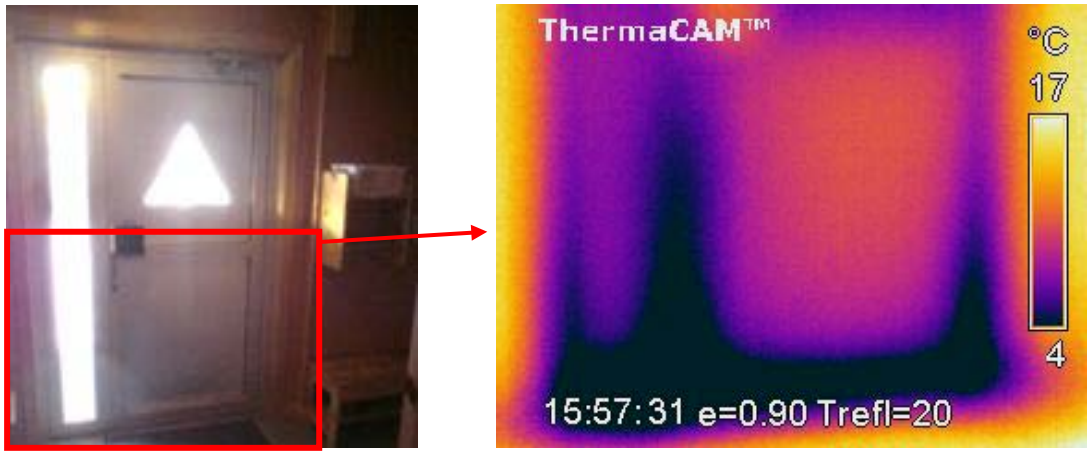
Siden gulvet innenfor ytterdøren ikke blir merkbart nedkjølt og det ikke kan sees noen jet-strømmer av kald luft virker det ikke som de kalde partiene skyldes infiltrasjon. Samtidig kan

det være vanskelig å se at gulvet blir nedkjølt på grunn av gulvvarmen. Infiltrasjonen fra ventilen i figur 7.7.10 viste heller ingen jet-strøm, så infiltrasjon kan være en av årsakene til at dørkarmene er kalde. Til tross for sterk solinnstråling mot dørkarmene, er de under 4 °C innvendig. Den beregnede U-verdien for dørene ville blitt høyere dersom det hadde vært tatt hensyn til at rammene er en kuldebro(figur 7.3.4-7.3.10). Det kommer ikke med i beregningen, som tar utgangspunkt i gjennomsnittsverdien for døren. Temperaturen er under 4 grader innvendig i de svarte området i bildene, som er tatt med manuell skala.

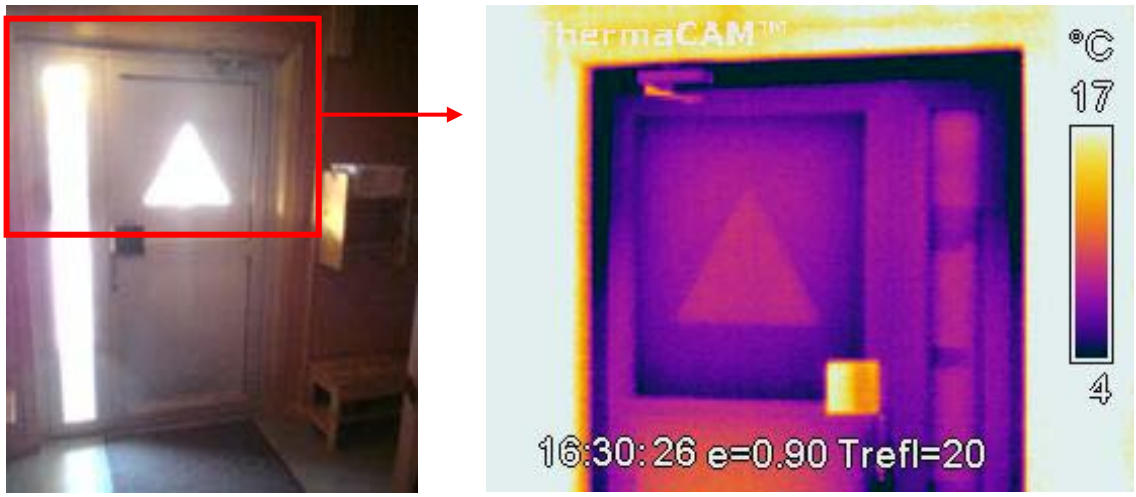


Figur 7.3.5 Nederst til venstre langs ytterdør 100 mot sør i rom 101 ”Grov garderobe”. 22.02(-14 °C)

Figur 7.3.6 Øverst til høyre langs ytterdør 100 mot sør i rom 101 ”Grov garderobe”. 22.02(-14 °C)

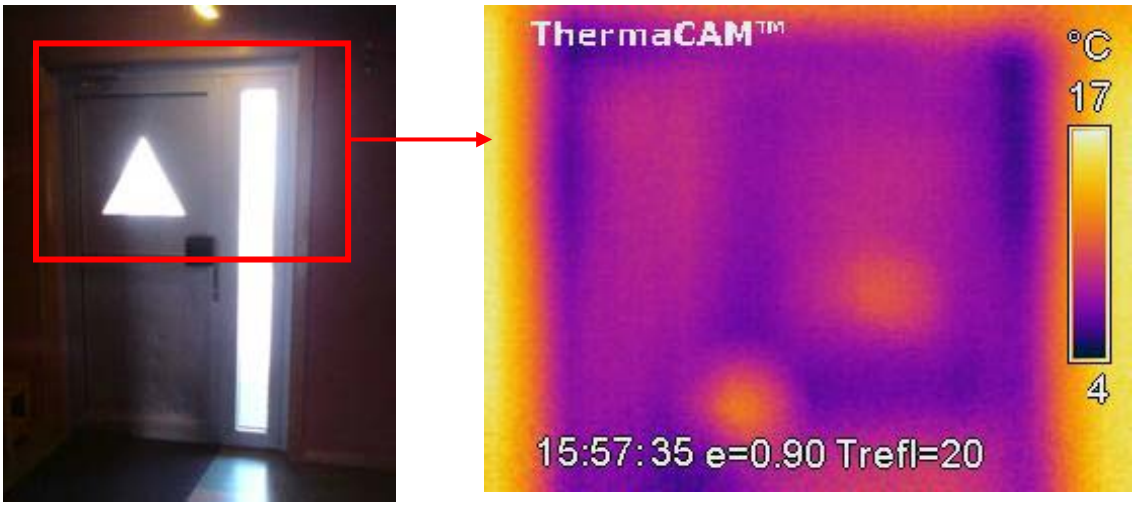


Figur 7.3.7 Nede langs ytterdør 140 mot vest i rom 134 ”Garderobe”. 22.02(-14 °C)

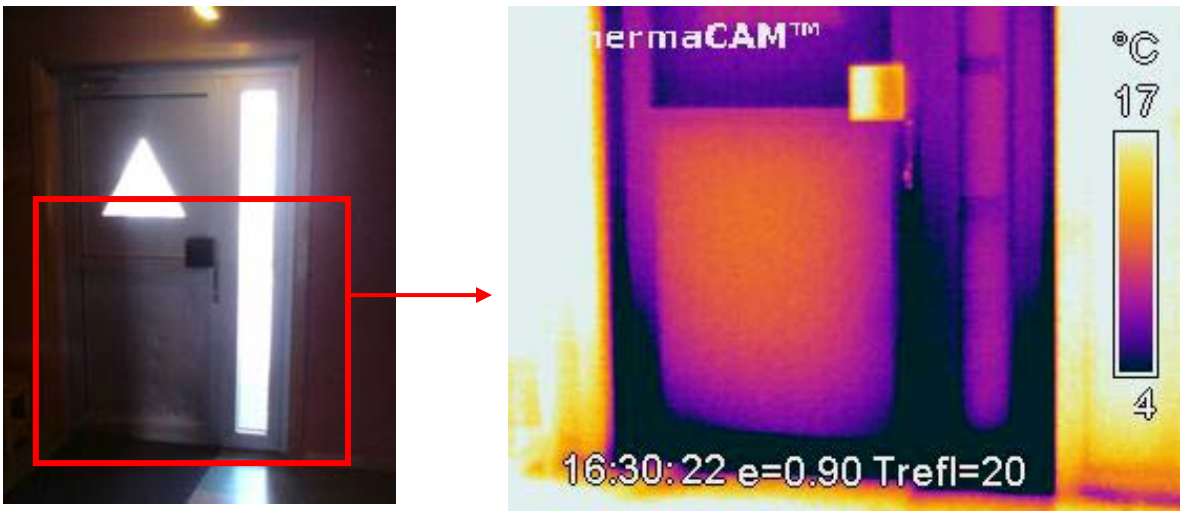


Figur 7.3.8 Oppe langs ytterdør 140 mot vest i rom 134 ”Garderobe”. 22.02(-14 °C)

Øvre del av døren i figur 7.3.9 er bedre enn de andre dørene, noe som kan skyldes solinnstråling mot døren eller at tetningen rundt dørrammen er bedre.



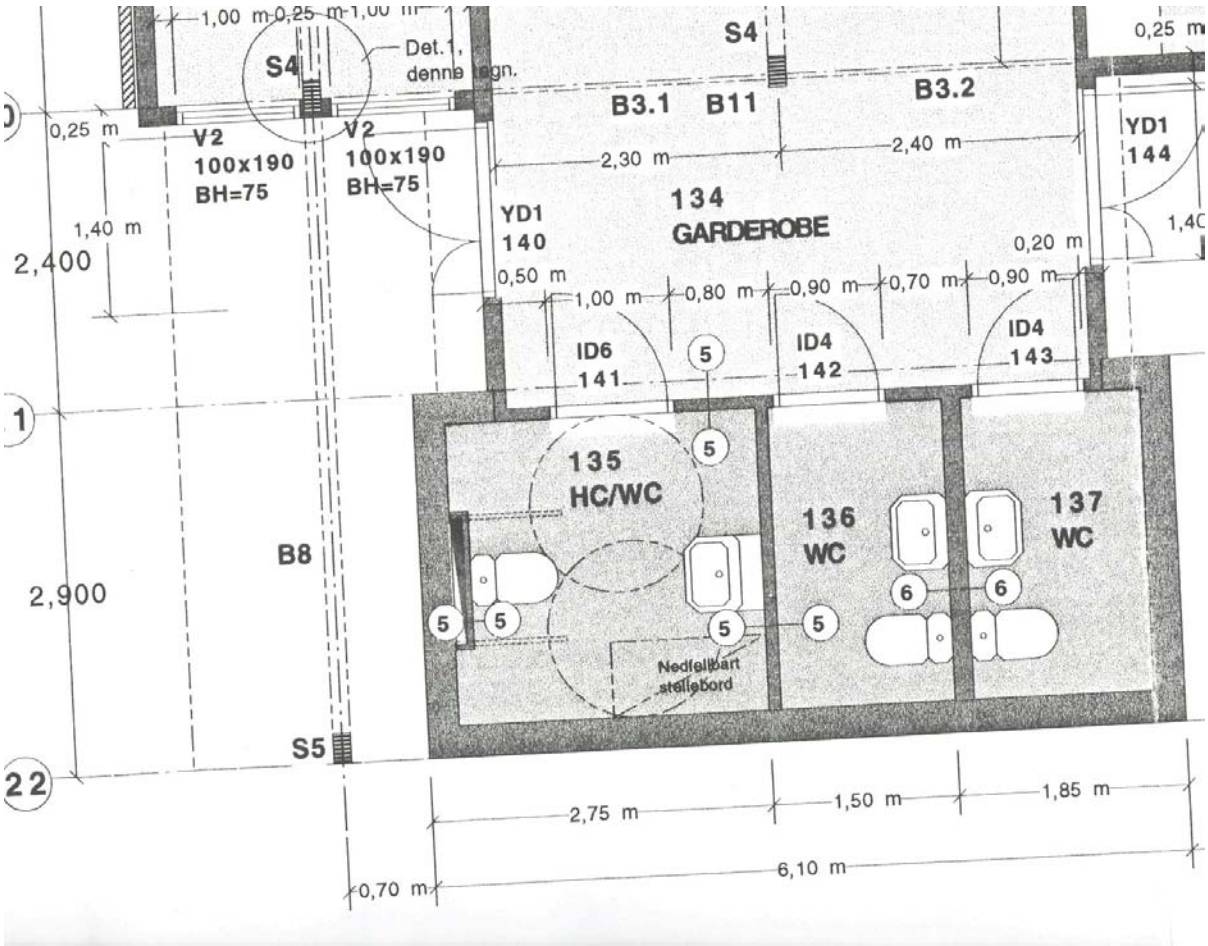
Figur 7.3.9 Oppe langs ytterdør 144 mot øst i rom 134 ”Garderobe”. 22.02(-14 °C)



Figur 7.3.10 Nede langs ytterdør 144 mot øst i rom 134 ”Garderobe”. 22.02(-14 °C)

7.4 Toalettene

Arkitekttegningene for oppbygningen av toalett 135-137 er vist i figur 7.4.1.



Figur 7.4.1 Bygningstegning fra toalettene 135 og 137

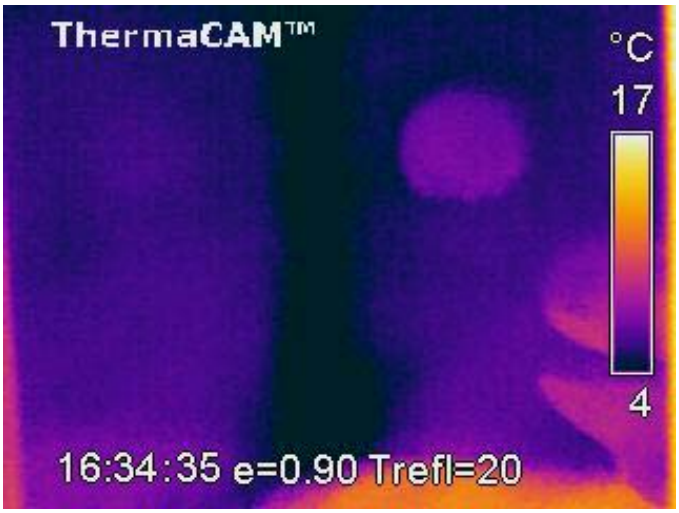
Figur 7.4.2 viser et bilde av de hvite ytterveggene i toalett 104-106 som stikker ut fra resten av bygget. Bildet illustrerer hvordan toalettveggene ser ut utvendig.

Figur 7.4.2 De hvite ytterveggene i toalettene er bygget opp av Leca-isoblokk med murpuss på begge sider.

Toalettene ble termografert tre forskjellige dager. Toalettene opplevdes som kalde de to dagene da utetemperaturen var under -10 °C.

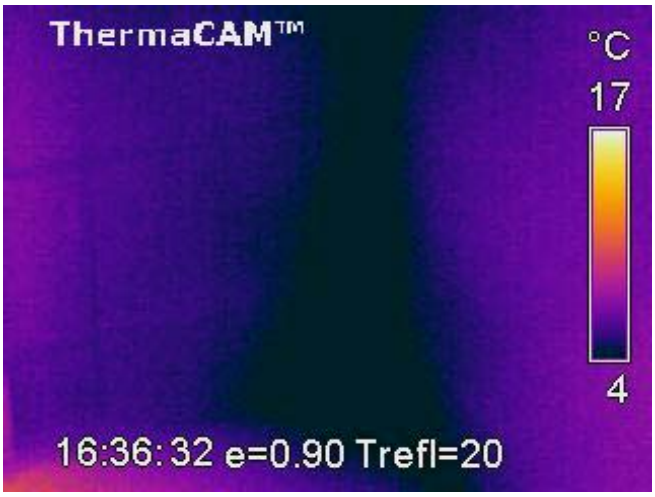
7.4.1 Toalett 137

Langs veggen i toalettet var gulvtemperaturen under 15 °C når utetemperaturen var -14 °C.(figur 7.4.1). Det er lavt, med tanke på at det er varme i gulvet, men ikke unormalt siden gulvet er dårlig isolert. Det er normalt at gulvtemperaturen er lavere innerst mot veggen.

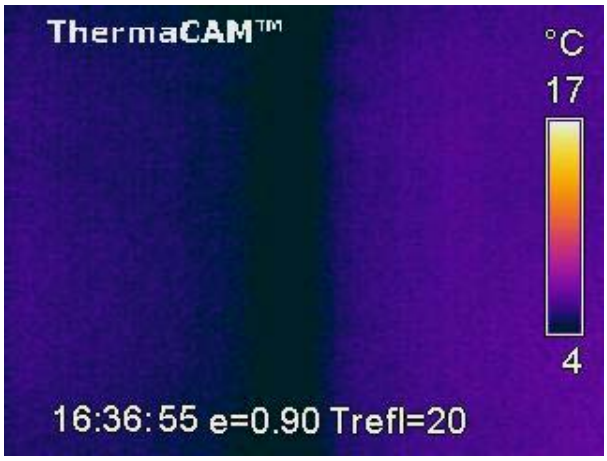


Figur 7.4.1 Hjørnet har en temperatur på under 4 °C og veggtemperaturen er ca 8 °C. Veggen til venstre er yttervegg mot øst mens veggen rett frem er yttervegg mot sør. 01.02(-14 °C)

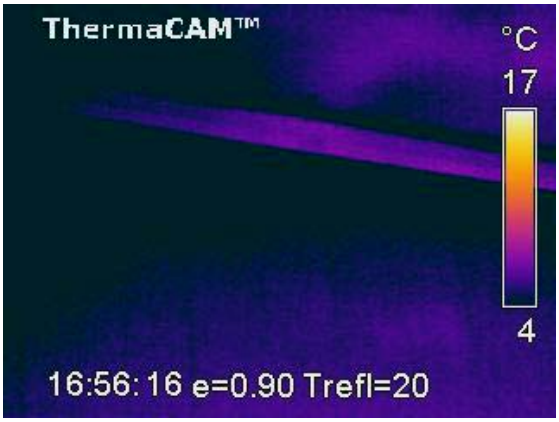
Figur 7.4.1-7.4.6 er tatt med en fast, manuell skala, slik at samme farge refererer til samme temperatur. Varmebildene viser de det er spesielt kaldt i hjørnene, der temperaturen er nede i 1,5 °C(figur 7.4.5) mens veggtemperaturen ellers er rundt 8 °C.



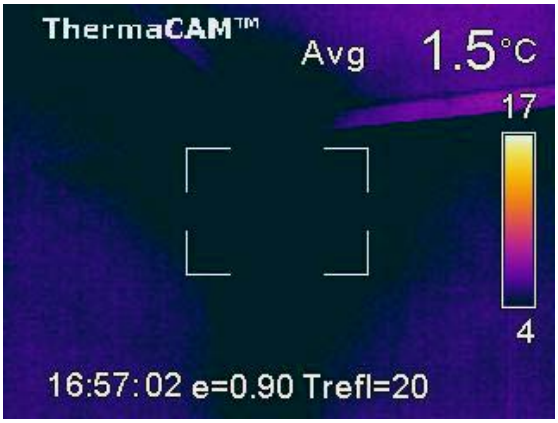
Figur 7.4.2 Hjørnet der veggen mot gang krysser ytterveggen mot øst har en temperatur på under 4 °C. Veggtemperaturen er ca 8 °C. 01.02(-14 °C)



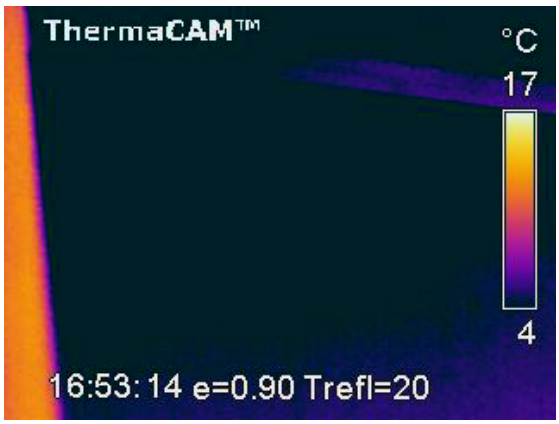
Figur 7.4.3 **Høyere opp i samme hjørne som i figur 7.4.2. Under 4 °C i hjørnet og veggtemperaturen på ca 8 °C. 01.02(-14 °C)**



Figur 7.4.4 **Yttervegg mot øst. Området rundt taklisten er under 4 °C. 01.02(-14 °C)**

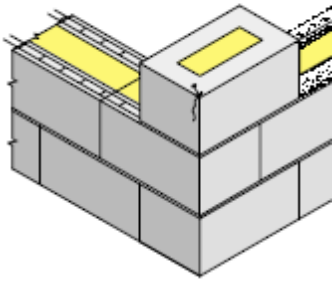


Figur 7.4.5 **Yttervegg mot øst (venstre i bildet) og yttervegg mot sør (høyre i bildet). Gjennomsnittstemperaturen i hjørnet er helt nede i 1,5 °C. 01.02(-14 °C)**



Figur 7.4.6 Yttervegg mot øst. Store deler av veggen er under 4 °C. 01.02(-14 °C)

Som beskrevet i kapittel 2.1 er det normalt at det er opptil 2 °C lavere temperatur i hjørnene i et rom. På toalettene er imidlertid temperaturen i hjørnene opptil 7 °C lavere enn sentralt på veggen. Temperaturene i hjørnene på toalettene er nede i 1,5 °C(figur 7.4.5), mens veggtemperaturen midt på veggen er ca. 8 °C. Siden varmebildene er tatt med manuell skala, er det ukjent hva den faktiske temperaturen i de svarte områdene i varmebildene fra toalettet er. På grunn av at det ikke bare er hjørnene som er kalde, men store deler av ytterveggene, er det ikke sikkert årsaken til at toalettene er kalde er kuldebroer eller infiltrasjon. Problemet kan ganske enkelt være at det er installert for lite effekt til oppvarming.



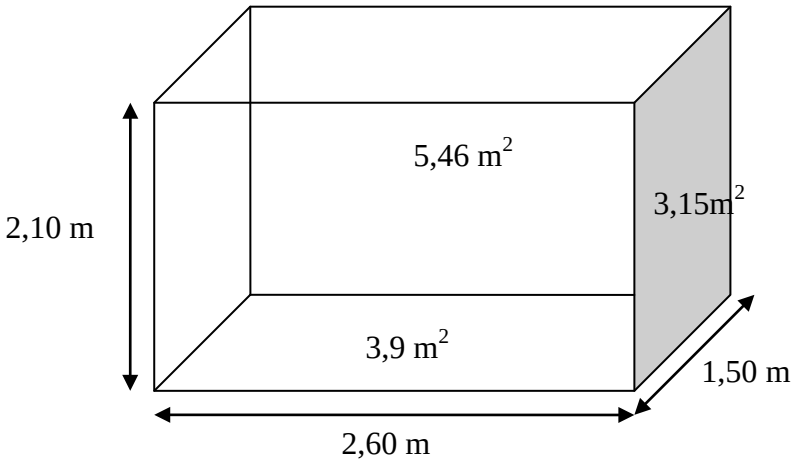
Figur 7.4.7 Det gjennomgående isolasjonslaget brytes i hjørnene.

Samtidig kan det være kuldebroer i hjørnene på veggen. Som figur 7.4.7 viser, brytes isolasjonen i Leca-iso-blokkene i hjørnene, noe som fører til at den gjennomgående betongen trolig blir en kuldebro. I tillegg er der fare for infiltrasjon dersom ikke skjøtene mellom Leca-blokkene er skikkelig tett. Som beskrevet i kapittel 5.1.4 er Leca-betongen i utgangspunktet luftåpen, så det er fare for infiltrasjon dersom murpussen på utsiden av veggen ikke er tett.

For å gjøre et anslag på varmegjennomgangen i toalettveggen beregnes U-verdien. De svarte områdene på varmebildene 7.4.1-7.4.6 antas å ha en temperatur på 1,5 °C, slik som hjørnet i figur 7.4.5. Resten av veggene ser ut til å ha en temperatur på 8 °C ut fra varmebilde 7.4.1-7.4.3. I utregningene av U-verdi tas det hensyn til at termografi-kameraet viser i gjennomsnitt 1,4 grader for lav temperatur, slik at den virkelige temperaturen antas å være 3 °C i hjørnene og 9 °C på veggene. Overflatene på toalettet antas å ha følgende temperaturer:

- En langvegg der 25 % av den sentrale delen av veggen er 3 °C, anslått ut fra de svarte områdene i figur 7.4.1,7.4.4 og 7.4.6.
- En kortvegg der 10 % av veggen er 3 °C ut fra figur 7.4.5.
- Resten av ytterveggene antas å være 9 °C.
- 25 % av taket antas å være 3 °C og resten 9 °C ut fra figur 7.4.4-6.
- Gulvet antas å være 15 °C ut fra figur 7.4.1.

Lufttemperaturen ble ikke målt, men er antatt å være 12 °C, som er tre grader høyere enn den gjennomsnittlige overflatetemperaturen i rommet T_{snitt} , som er 9,3 °C. T_{snitt} er beregnet i ligning 7-2 ved at temperaturen til av veggene, taket og gulvet er vektet mot arealet av overflatene. Arealet av overflatene er vist i figur 7.4.9.



Figur 7.4.9 Toalett 137 er 1,50 m bredt, 2,10 m høyt og 2,60 m langt.

.

$$T_{snitt} = \frac{\begin{array}{l}(25\% \cdot 3°C + 75\% \cdot 9°C) \cdot 5,46 + 9°C \cdot 5,46 + (10\% \cdot 3°C + 90\% \cdot 9°C) \cdot 3,15 \\ +9°C \cdot 3,15 + 15°C \cdot 3,9 + (0,25 \cdot 3°C + 0,75 \cdot 9°C) \cdot 3,9\end{array}}{(5,46 + 3,15 + 3,9) \cdot 2} = 9,3\ °C$$

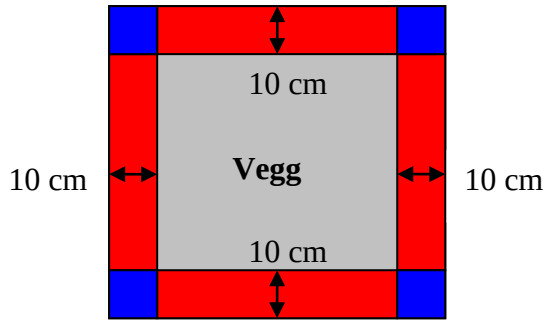
(ligning 7-2)

Lufttemperaturen er forventet å være noe høyere enn den gjennomsnittlige overflatetemperaturen på grunn av at luften tilføres toalettet gjennom overstrømning fra garderoben. Temperaturen i garderoben ble målt til 18 °C med lufttemperaturmåler. Det er imidlertid ikke så stor luftutskiftning, så det virker rimelig at lufttemperaturen ligger nær veggtemperaturen.

U-verdiene til ulike deler av ytterveggene på toalettet er beregnet ut fra ligning 3-1. I beregningene av U-verdien deles hver av de to ytterveggene opp i 3 soner, fordi den innvendige varmeovergangsmotstanden, som er gitt i tabell 3.1, varierer for hver av sonene:

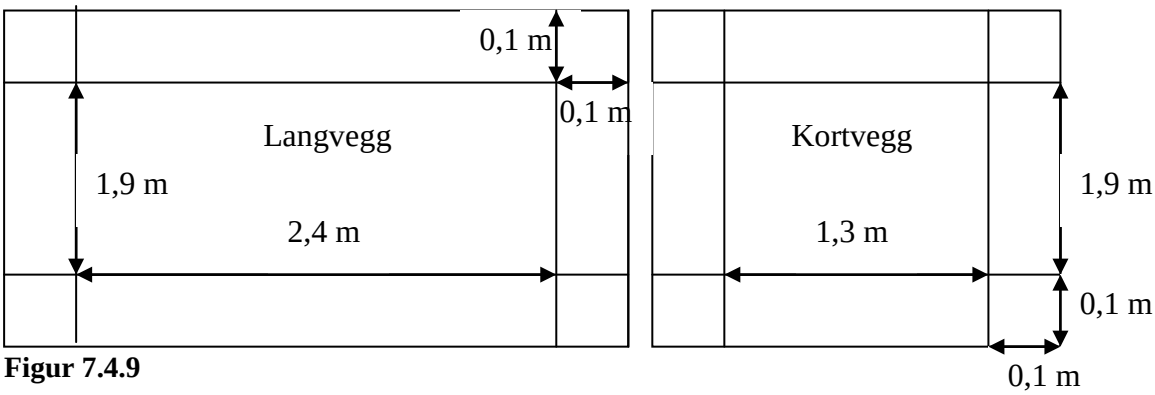
- sentralt på veggen(grått område på figur 7.4.8)
- 2 dimensjonale hjørner(røde områder på figur 7.4.8)
- 3 dimensjonale hjørner(blå områder på figur 7.4.8)

Det antas at hjørnene strekker seg 10 cm ut på hver side av veggen.



Figur 7.4.8 Den innerste ytterveggen(bildet) oppdelt i soner

Arealene av de respektive delene av veggen i figur 7.4.8 regnes ut fra figur 7.4.9



Figur 7.4.9

Totalt areal av 2D hjørner:
$1,9\text{m}^2 \cdot 0,1\text{m}^2 \cdot 2 + 1,3\text{m}^2 \cdot 0,1\text{m}^2 \cdot 2 + 1,9\text{m}^2 \cdot 0,1\text{m}^2 \cdot 2 + 2,4\text{m}^2 \cdot 0,1\text{m}^2 \cdot 2 = 1,5\text{m}^2$

Totalt areal av 3D hjørner: $0,1\text{m}^2 \cdot 0,1\text{m}^2 \cdot 8 = 0,08\text{m}^2$

Totalt areal av vegger 3 °C: $1,9\text{m}^2 \cdot 2,4\text{m}^2 \cdot 25\% + 1,3\text{m}^2 \cdot 1,9\text{m}^2 \cdot 10\% = 1,39\text{m}^2$

Areal vegger 9 °C: $1,9\text{m}^2 \cdot 2,4\text{m}^2 \cdot 75\% + 1,3\text{m}^2 \cdot 1,9\text{m}^2 \cdot 90\% = 5,64\text{m}^2$

U-verdien for de respektive delene av veggen er gitt i ligning 7-3 til 7-6.

$$U_{\text{vegg på 2 grader}} = \frac{T_{inne} - T_{si}}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})} = \frac{12-3}{0,13 \cdot (12-(-13,5))} = 2,71 \pm 2,13\text{W/m}^2\text{K}$$

(ligning 7-3)

$$U_{\text{vegg på 8 grader}} = \frac{T_{inne} - T_{si}}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})} = \frac{12-9}{0,13 \cdot (12-(-13,5))} = 0,90 \pm 0,89\ \text{W/m}^2\text{K}$$

(ligning 7-4)

$$U_{\text{2D hjørne}} = \frac{T_{inne} - T_{si}}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})} = \frac{12-3}{0,20 \cdot (12-(-13,5))} = 1,76 \pm 0,93\ \text{W/m}^2\text{K}$$

(ligning 7-5)

$$U_{\text{3D hjørne}} = \frac{T_{inne} - T_{si}}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})} = \frac{12-3}{0,25 \cdot (12-(-13,5))} = 1,41 \pm 0,61 \text{ W/m}^2\text{K}$$

(ligning 7-6)

Deretter regnes det ut en gjennomsnittlig U-verdi for veggene i rommet ut i ligning 7-8 ut fra ligning 7-7.

$$\text{U}_{\text{yttervegg,toalett}} = \frac{\text{U}_{\text{2D hjørne}} \cdot \text{A}_{\text{2D hjørne}} + \text{U}_{\text{3D hjørne}} \cdot \text{A}_{\text{3D hjørne}} + \\ + \text{U}_{\text{vegg 2°C}} \cdot \text{A}_{\text{vegg 2°C}} + \text{U}_{\text{vegg 8°C}} \cdot \text{A}_{\text{vegg 8°C}}}{\text{A}_{\text{2D hjørne}} + \text{A}_{\text{3D hjørne}} + \text{A}_{\text{vegg 2°C}} + \text{A}_{\text{vegg 8°C}}}$$

(ligning 7-7)

$$\text{U}_{\text{yttervegg,toalett}} = \frac{1,76 \cdot 1,5 + 1,41 \cdot 0,08 + 2,71 \cdot 1,39 + 0,90 \cdot 5,64}{5,46 + 3,15} = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

(ligning 7-8)

ΔT_{inne} settes lik 2 siden lufttemperaturen i rommet bare er anslått ut fra veggtemperaturen,

ΔT_{su} settes til 0,5 siden T_{su} leses av med opptil en halv grads feil fra EOS-loggen,

ΔT_{si} settes til 0,5 siden T_{si} er basert på en gjennomsnittsverdi av mange målinger.

ΔR_{si} settes lik 0,10(se kapittel 4).

Usikkerheten i den samlede U-verdien til ytterveggene på toalettet er gitt av ligning 7-9.

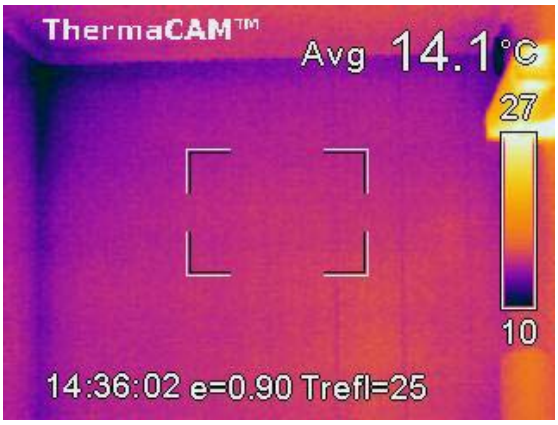
$$\Delta U_{\text{yttervegg,toalett}} = \frac{0,93 \cdot 1,5 + 0,61 \cdot 0,08 + 2,13 \cdot 1,39 + 0,89 \cdot 5,64}{5,46 + 3,15} = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

(ligning 7-9)

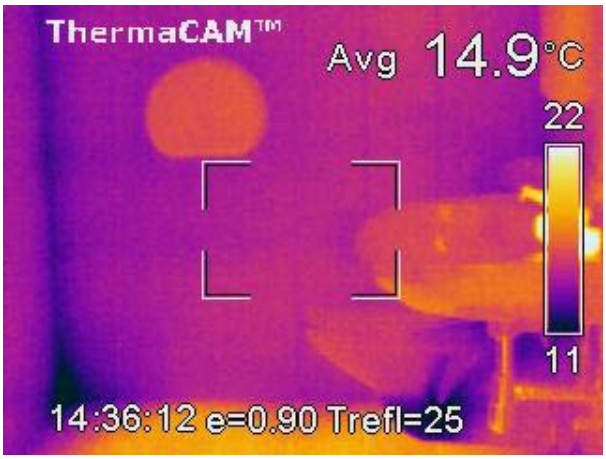
U-verdien til veggen er dermed beregnet til å ligge i intervallet 0,2-2,4 W/m^{2}K , så mest sannsynlig er U-verdien langt over kravet i byggeforskriftene fra 1987 på 0,30 W/m^{2}K (tabell 5.2.3). Kravene i dagens byggerforskrift er på 0,18 W/m^{2}K . På grunn av stor usikkerhet i Rsi og innetemperaturen blir det stor usikkerhet i den beregnede U-verdien. Wachenfeldt beregnet U-verdien til 0,62 W/m^{2}K (tabell 5.2.2). Grunnen til at det er så stort avvik mellom de to beregningene kan være at Wachenfeldt har beregnet en gjennomsnittsverdi for alle toalettene, mens beregningen i ligning 7-8 er gjort på det som fremstod som det kaldeste toalettet.

Det er vanskelig å vurdere om det er kuldebroer på toalettet, uten å ha et bedre bilde av temperaturfordelingen på veggen. Derfor burde det vært gjort flere punktmålinger med kontakttermometer. Eventuelt burde det blitt tatt flere bilder der termografi-kameraets skala ble stilt inn automatisk, slik at det kom frem hva temperaturen i de svarte områdene i varmebilde 7.4.1-7.4.6 var.

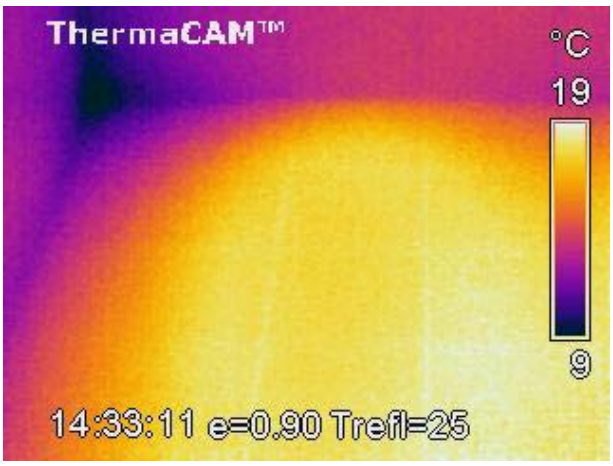
Den siste dagen termograferingen ble utført var utetemperaturen 1 °C. Varmebildene i figur 7.4.11-7.4.19 viser at veggtemperaturen på toalettet er ca. 15 °C. Det stemmer med en kontrollmåling med kontakttermometer. De tredimensjonale hjørnene på toalettet er rundt 10 °C. De kalde hjørnene skyldes blant annet at den innvendige varmeovergangsmotstanden er høyere her enn midt på veggen(tabell 3.1). Samtidig mistenkes det at den kan være en kuldebro eller luftlekkasje i hjørnene på figur 7.4.13 og 7.4.21 fordi gulvvarmen burde hevet temperaturen i hjørnet. Siden varmeledningen i betong er god, burde ikke hjørnet være 10 grader kaldere enn gulvet like ved. Lufttemperaturen på toalettet ble målt til 16 °C.



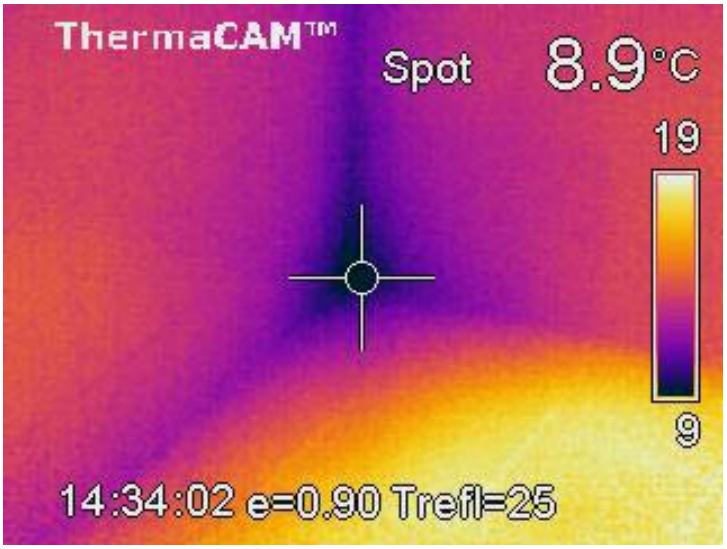
Figur 7.4.11 Veggtemperatur på 14 °C oppe på yttervegg mot sør.17.03(1 °C)



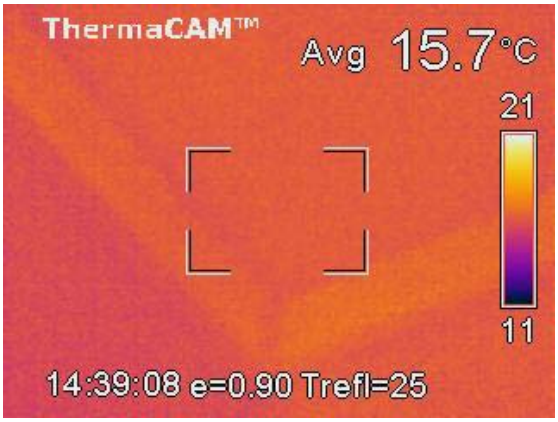
Figur 7.4.12 Veggtemperatur på 14,9 °C nede på yttervegg mot sør. 17.03(1 °C)



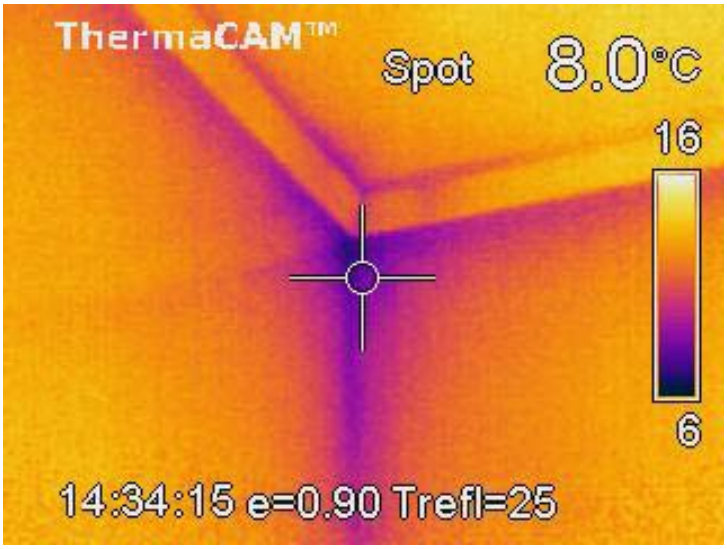
Figur 7.4.13 Gulvtemperaturen er 19 °C midt på gulvet, men tydelig lavere til venstre mot ytterveggen. 17.03(1 °C)



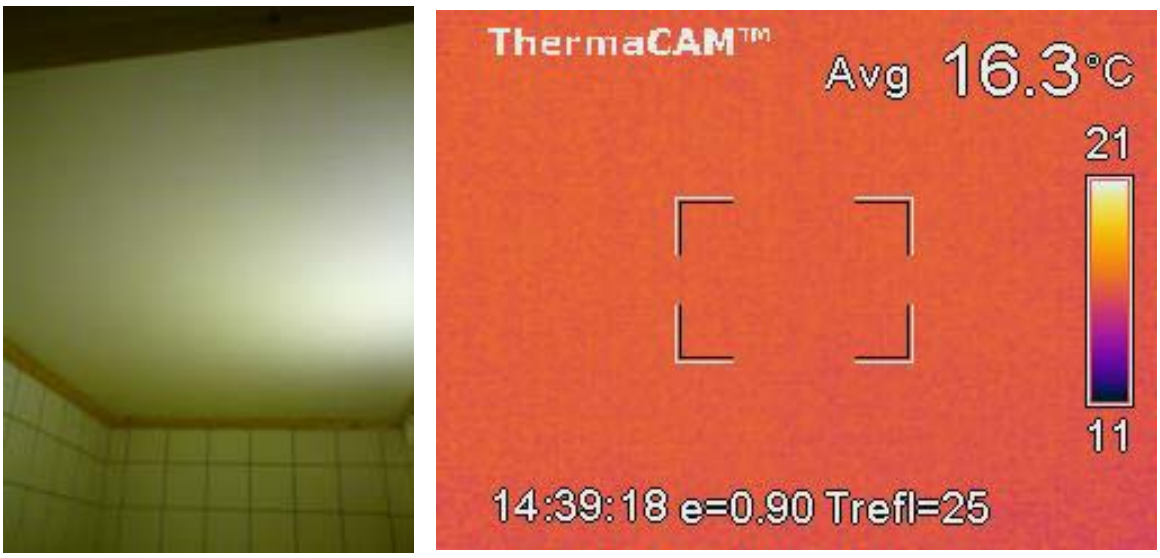
Figur 7.4.14 Temperaturen er ca. 9 °C nederst i hjørnet mellom ytterveggene. 17.03(1 °C)



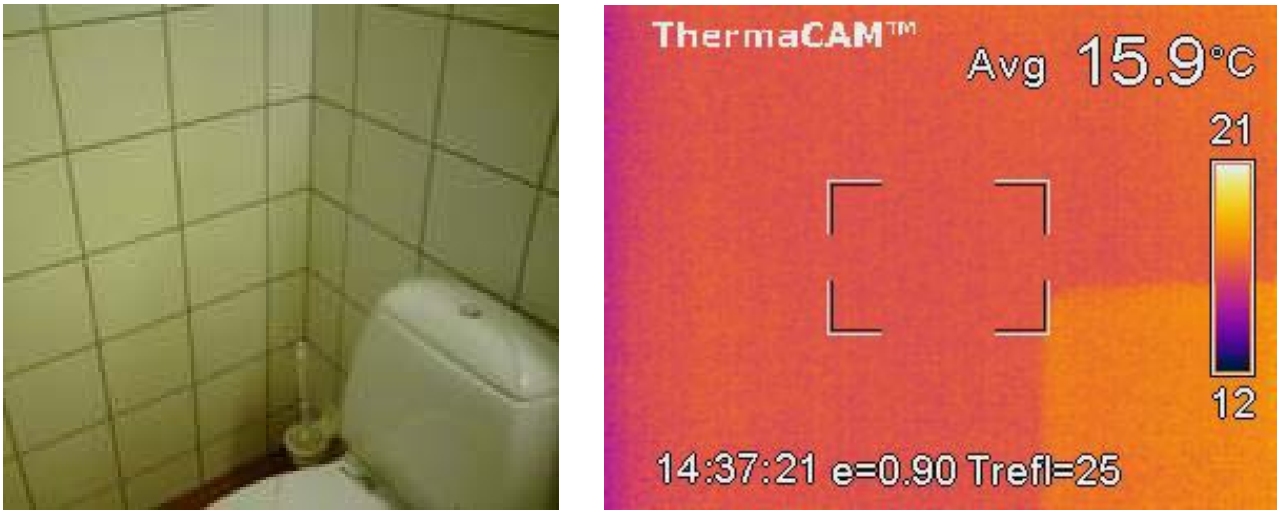
Figur 7.4.15 Temperaturen er 15,7 °C i taket over inngangsdøren. Veggen til venstre i bildet er mot et annet toalett. 17.03(1 °C)



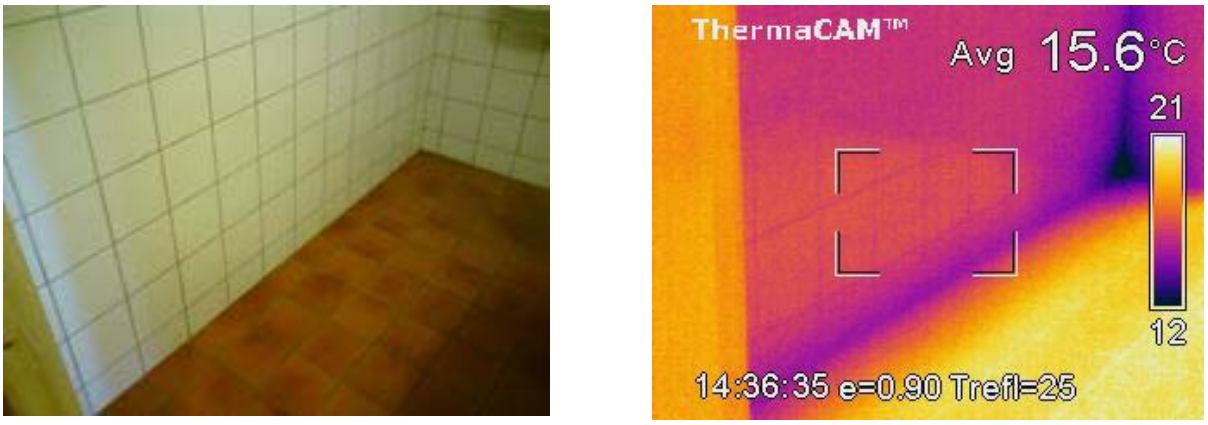
Figur 7.4.15 Ned mot 6 °C i hjørnet mellom ytterveggene øverst mot taket, mens veggen og taket rundt er på omtrent 16 °C. Trolig infiltrasjon eller kuldebro. 17.03(1 °C)



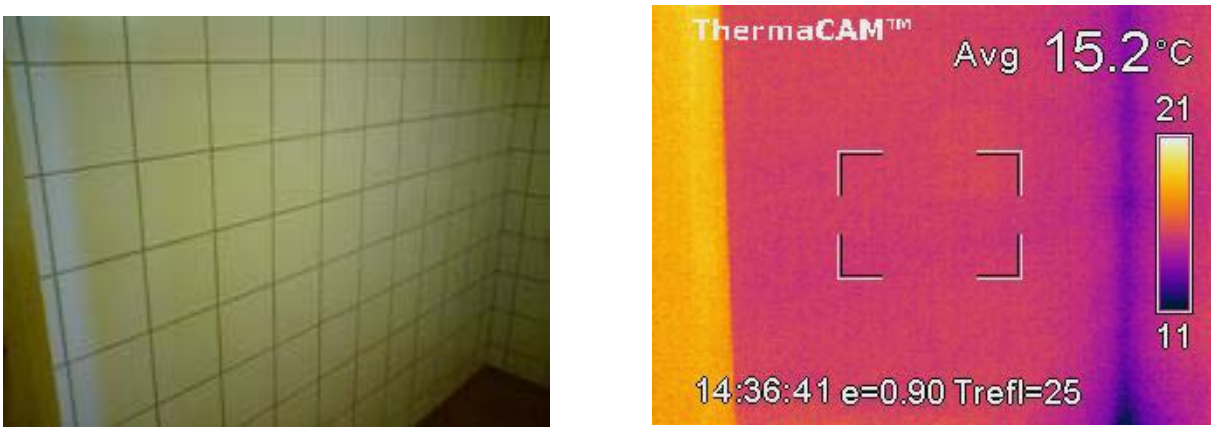
Figur 7.4.16 **16,3 °C midt i taket. 17.03(1 °C)**



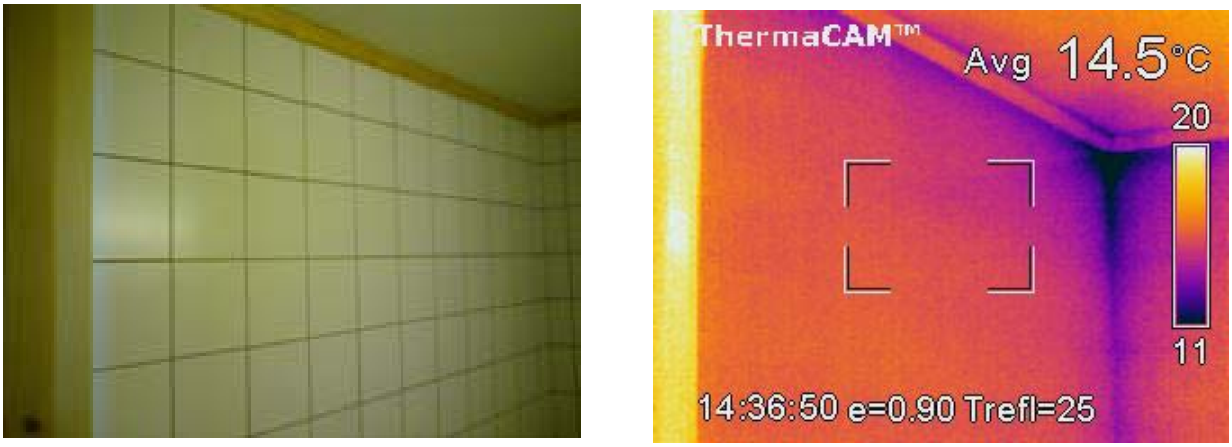
Figur 7.4.17 **15,9 °C på veggen bak do. Veggen til venstre i bildet er yttervegg mot sør. Den andre veggen vender mot et annet toalett. 17.03(1 °C)**



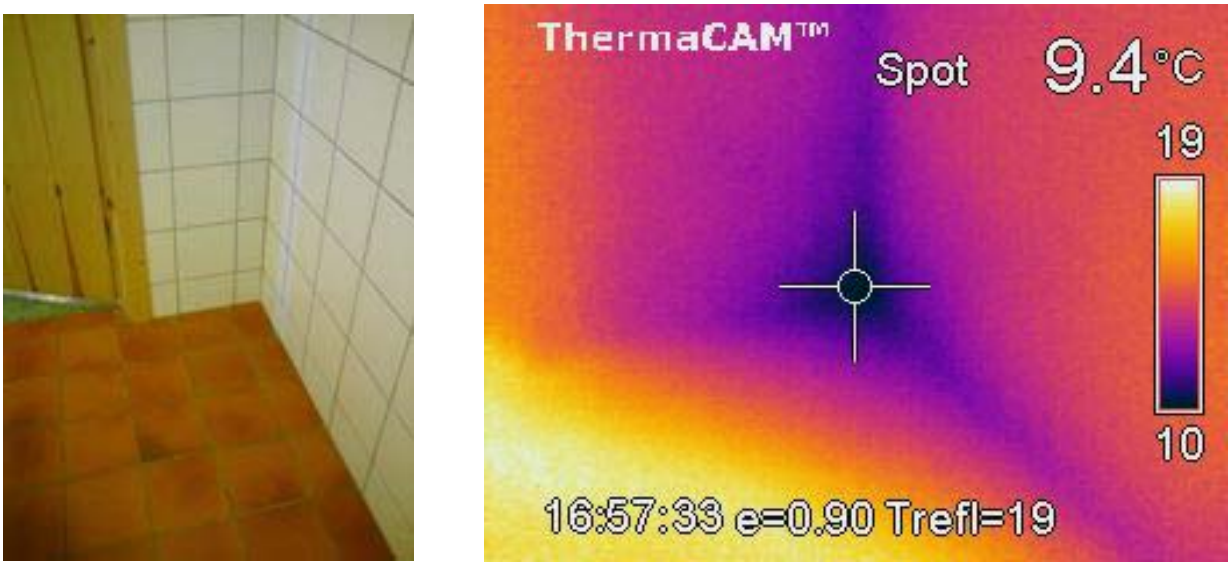
Figur 7.4.18 **15,6 °C nede på den venstre ytterveggen mot øst. 17.03(1 °C)**



Figur 7.4.19 15,2 °C midt på den venstre ytterveggen mot øst. 17.03(1 °C)



Figur 7.4.20 14,5 °C oppe på den venstre ytterveggen mot øst. 17.03(1 °C)



Figur 7.4.21 9,4 °C i hjørnet ved inngangsdøren. Veggen til høyre i bildet er yttervegg mot øst. 10 graders temperaturforskjell mellom gulvet og hjørnet tyder på kuldebro eller infiltrasjon. 17.03(1 °C)

$$U_{\text{yttervegg, toalett}} = \frac{T_{inne} - T_{si}}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})} = \frac{16-15}{0{,}13 \cdot (16-1)} = 0{,}5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{ligning 7-10}$$

ΔT_{inne} settes til 0,5 på grunn av en antatt unøyaktighet i lufttemperaturmåleren.

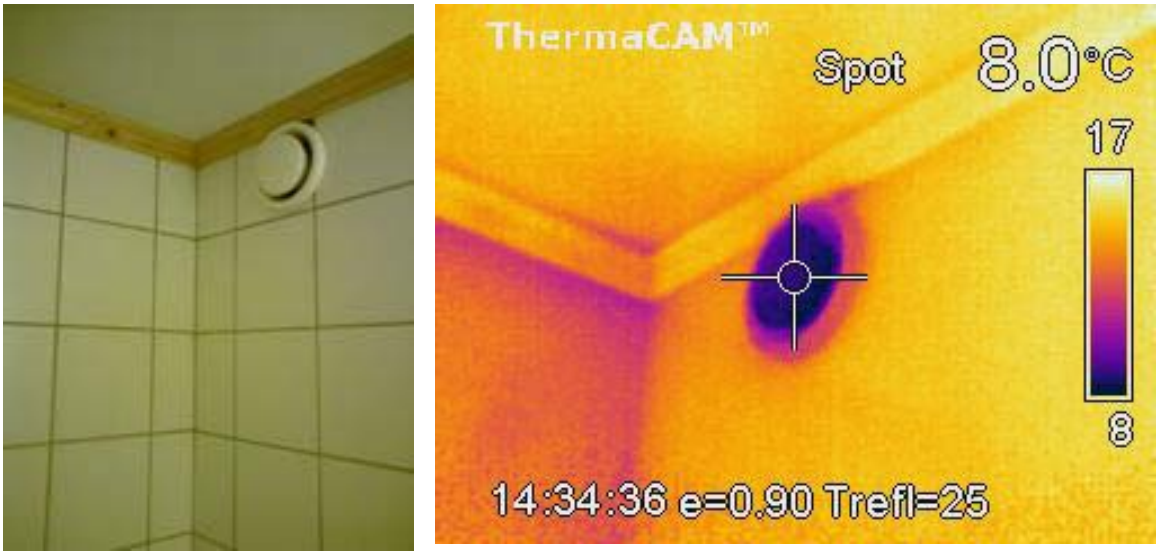
ΔT_{su} settes lik 2 siden T_{su} er tilnærmet til utendørs lufttemperatur. Overflatetemperatur-målingene på ytterveggen i toalettet i figur 7.9.2 viser at overflate-temperaturen avviker flere grader fra lufttemperaturen.

ΔT_{si} settes derfor lik 1 siden T_{si} er en gjennomsnittsverdi av flere målinger med termografi-kameraet. I tillegg er målingen kontrollert med kontakttermometer. Den beregnede unøyaktigheten i termografi-kameraets temperaturmåling i kapittel 6 viste at termografi-kameraet i gjennomsnitt viste 1,4 grader for lav temperatur. Siden veggtemperaturen er en gjennomsnittsverdi, blir usikkerheten mindre enn i en enkelt måling.

ΔR_{si} settes lik 0,10(se kapittel 4).

Usikkerheten ΔU_{vegg} blir da $\pm 0{,}7$ W/m^{2}K ut fra ligning 4-3. U-verdien til veggen ligger altså i intervallet 0-1,2 W/m^{2}K i følge denne beregningen. Resultatet blir svært usikkert fordi differansen mellom veggens temperatur og lufttemperaturen er så liten.

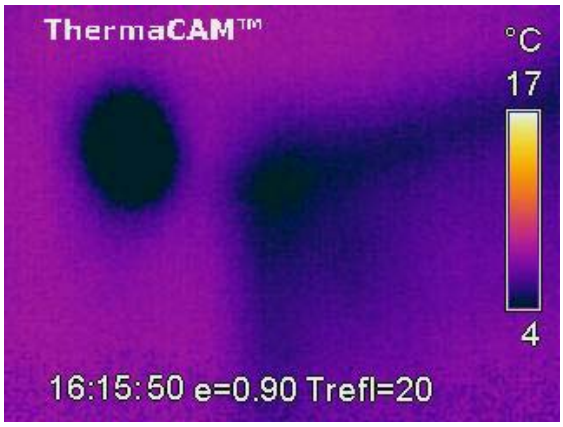
Avtrekksventilene er også kalde, noe figur 7.4.22 og figur 7.4.23 viser. I figur 7.4.22 var det forventet at avtrekksventilen skulle være 16 °C, slik som luften i rommet som den trekker av, men avtrekksventilen har en temperatur på 8 °C. Siden avtrekksventilen er så kjølig når avtrekksviften går, er den en kuldebro.



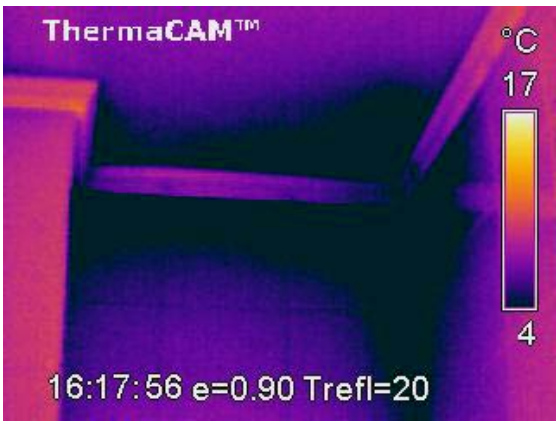
Figur 7.4.22 Avtrekksventilen på toalett 137 holder 8 °C og veggen holder 15 °C. Veggen til venstre i bildet er yttervegg mot sør, mens veggen til høyre er vegg mot annet toalett. 17.03(1 °C)

7.4.2 Toalett 135

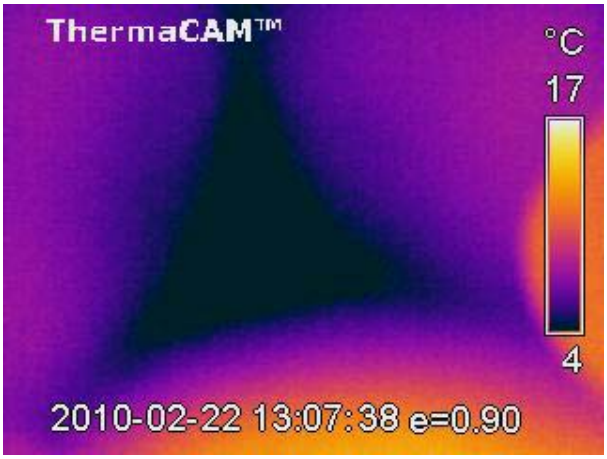
Toalett 135(figur 7.4.2) ble termografert da utetemperaturen var -16 °C. Veggtemperaturen var da nede i rundt 9 °C, mens hjørnene og avtrekksventilene på ytterveggen var under 4 °C.



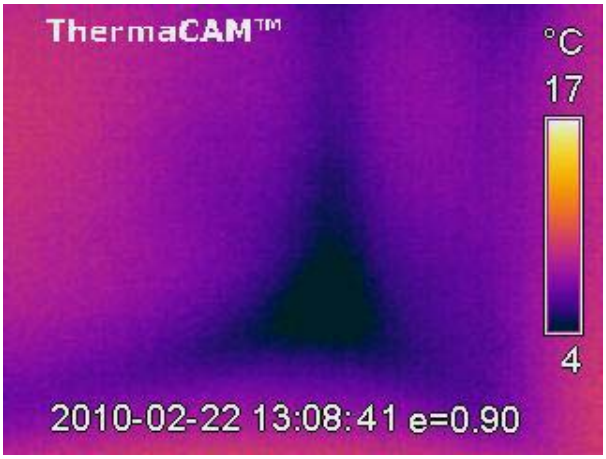
Figur 7.4.23 Avtrekksventilen på yttervegg mot vest er under 4 °C og veggen er rundt 9 °C. 22.02(-16 °C)



Figur 7.4.24 Hjørnet mot taket er under 4 °C og ytterveggen mot vest er rundt 9 °C. 22.02(-16 °C)



Figur 7.4.25 Hjørnet er under 4 °C. Veggen til venstre i bildet er yttervegg mot sør og veggen til høyre er yttervegg mot vest. Gulvet er rundt 15 °C. Hjørnet ser ut til å bli nedkjølt av infiltrasjon eller av en kuldebro på grunn av at det er over 10 graders temperaturforskjell mellom gulvet like ved hjørnet og hjørnet. 22.02(-14 °C)

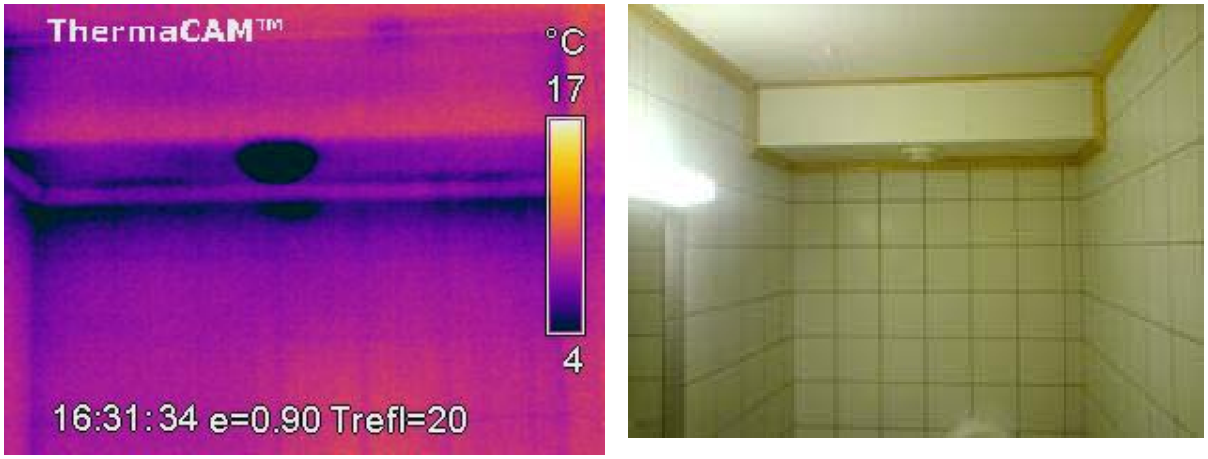


Figur 7.4.26 Hjørnet er under 4 °C. Gulvet og veggen er rundt 9 °C. Veggen til venstre i bildet er yttervegg mot vest, mens veggen til høyre i bildet er yttervegg mot sør. Gulvet foran hjørnet er like kaldt som veggen.22.02(-14 °C)

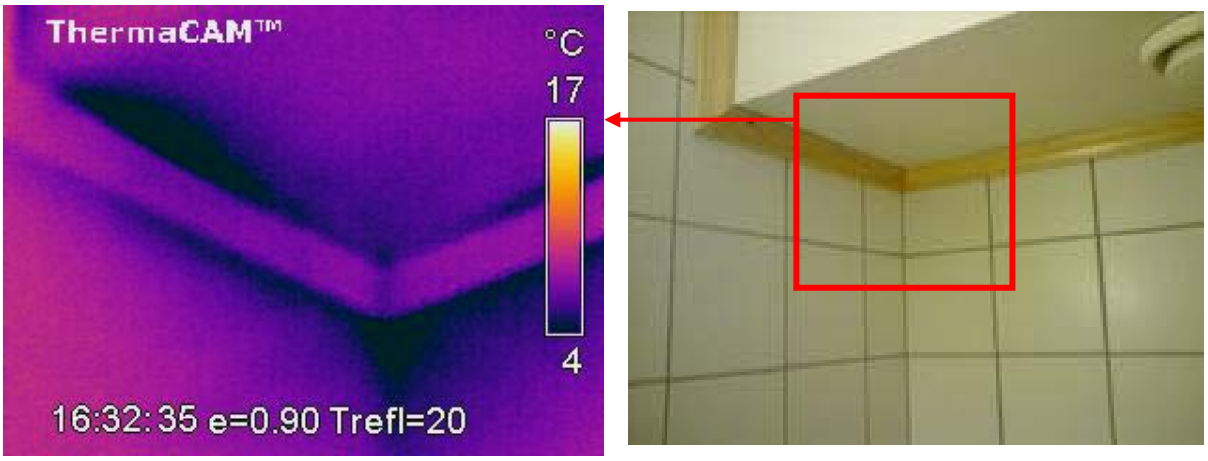
Varmebildene fra toalett 135 viser at det er kaldt i hjørnene mot ytterveggen. Det er imidlertid ikke så store områder som er under 4 grader som på toalett 137. Hovedårsaken er trolig at toalett 135 har 69 % større gulvareal enn toalett 137, slik at varmetilskuddet til rommet er 69 % større. Arealet av yttervegger er imidlertid omtrent det samme for de to toalettene.

7.4.3 Toalett 136

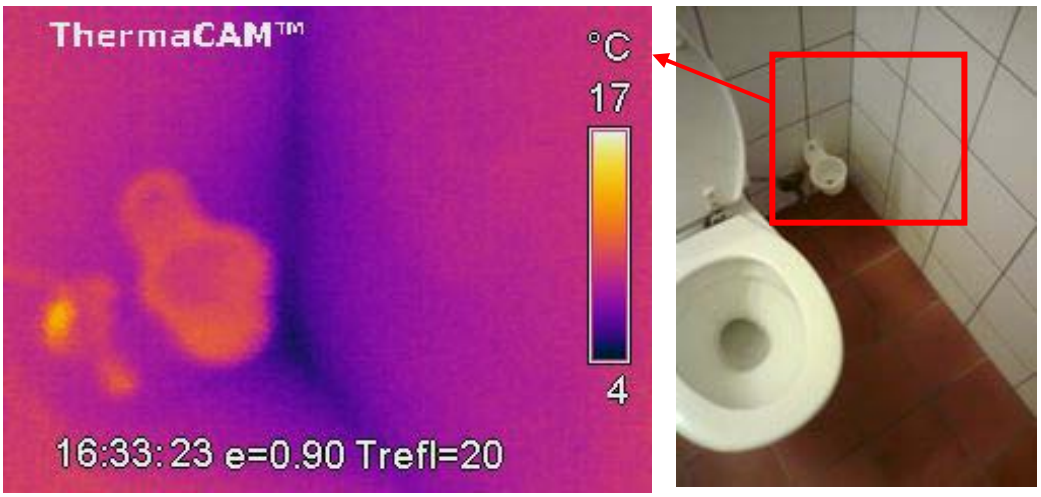
Toalettene 136 ble termografert 22.02. Utetemperaturen var ca. -16 °C, ut fra en lineær interpolasjon mellom temperaturmålingene i tabell 7.2.1. Figur 7.4.27-29 viser at toalettet ikke var like kaldt som toalett 135-137. Veggtemperaturen varierte fra ca. 8-13 °C og det var kun små områder i hjørnene som var under 4 °C, slik som på toalett 135. Det var forventet, siden ytterveggen ikke har noen hjørner langs toalett 136. I tillegg har toalett 136 bare en yttervegg.



Figur 7.4.27 Kald avtrekksventil og kaldt rundt listen under ventilen. Veggtemperatur på rundt 8 °C. 22.02(-16 °C)



Figur 7.4.28 Kaldt mot taket over taklisten. Mistanke om infiltrasjon eller kuldebro, siden det kalde området bare strekker seg langs deler av taklisten.22.02(-16 °C)



Figur 7.4.29 Jevn temperatur på rundt 8 °C på veggene, og et smalt parti innerste i hjørnet på 4 °C. 22.02(-16 °C)

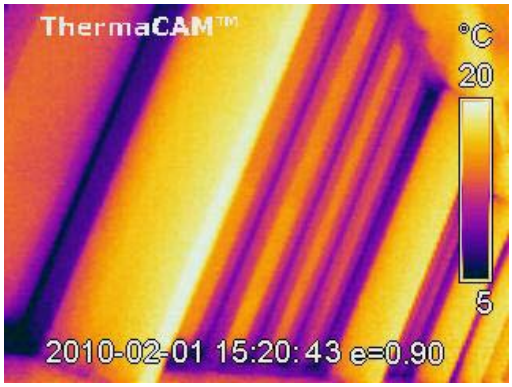
Dersom man sammenligner hjørnet i figur 7.4.29 mot hjørnene i 7.4.12-14,18,21,25-26 der veggtemperaturen er så å si den samme, virker det sannsynlig at det er kuldebroer eller luftlekkasjer i 7.4.12-14,18,21,25-26, siden hjørnene er betydelig kaldere enn i figur 7.4.29.

7.5 Loftet

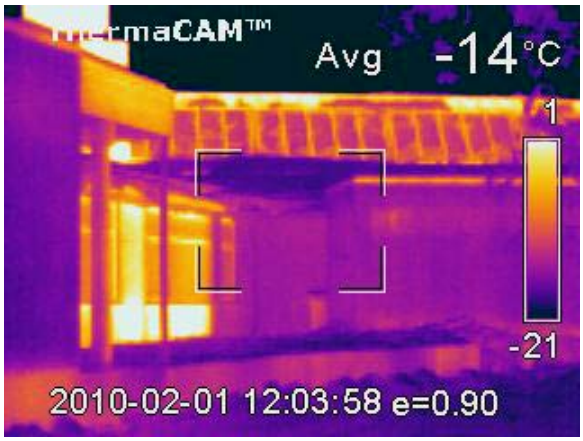
Varmebildet i figur 7.5.1 viser at vindusrammene av metall er en kuldebro. Rammene ser ut til å ha hatt en temperatur på rundt 8 °C, mens den gjennomsnittlige innvendige temperaturen på vindusglasset ser ut til å ha vært rundt 12 °C. Termografi-kameraet viser i gjennomsnitt 1,4 grader for lav temperatur(kapittel 6). På grunn av at glass har en emissivitet på 0,86(tabell 1.1.1), mens kameraets emissivitet er innstilt til 0,90, antas det ut fra tabell 1.1.2 at feilen i emissivitet fører til at termografi-kameraet viser rundt 0,6 grader for høy temperatur. Totalt skulle termografi-kameraet dermed vise rundt 1 °C for lav temperatur, slik at vindusglassenes temperatur er rundt 11 °C, mens rammen er ca 7 °C. Den gjennomsnittlige temperaturen på glass og ramme for vinduene settes til 10 °C, ut fra en antagelse i ligning 7-11 om at rammen utgjør 20 % av arealet av vinduet.

$$T_{vindu} = 7°\text{C} \cdot 20\% + 11°\text{C} \cdot 80\% = 10,2°\text{C} \qquad \text{(ligning 7-11)}$$

Lufttemperaturen på avtrekksloftet antas å ha vært 20 °C. Antagelig er den høyere, siden settpunktet i klasserommet er 20 °C og tilluften hadde en temperatur på rundt 24 °C(kapittel 7.6). Dersom temperaturen på loftet var over 20 °C, kan den beregnede U-verdien ha blitt litt for lav.

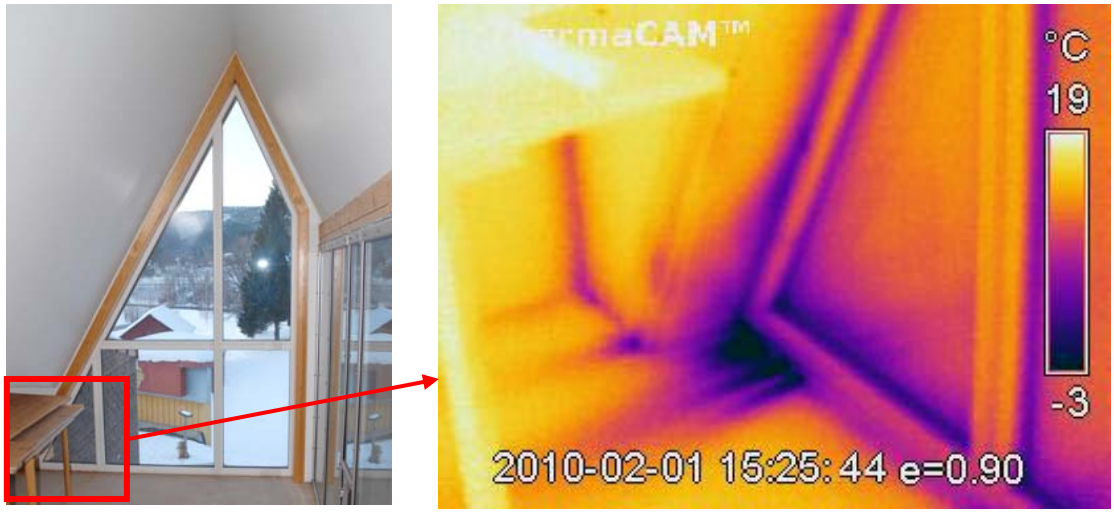


Figur 7.5.1 Vinduer på loftet mot sørvest.(01.02, -14 °C)

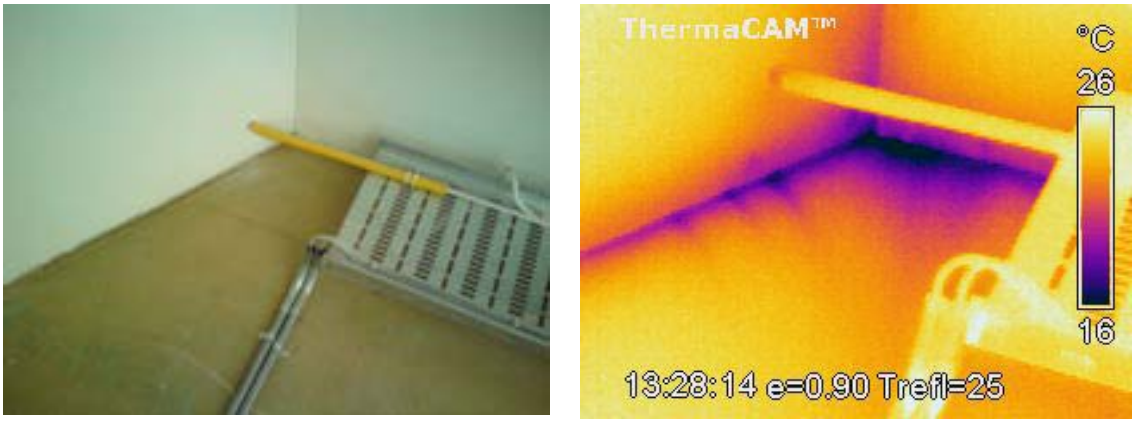


Figur 7.5.2 Vindusrammene på loftet fremstår tydelig som varme utenfra.(01.02, -12 °C kl 12)

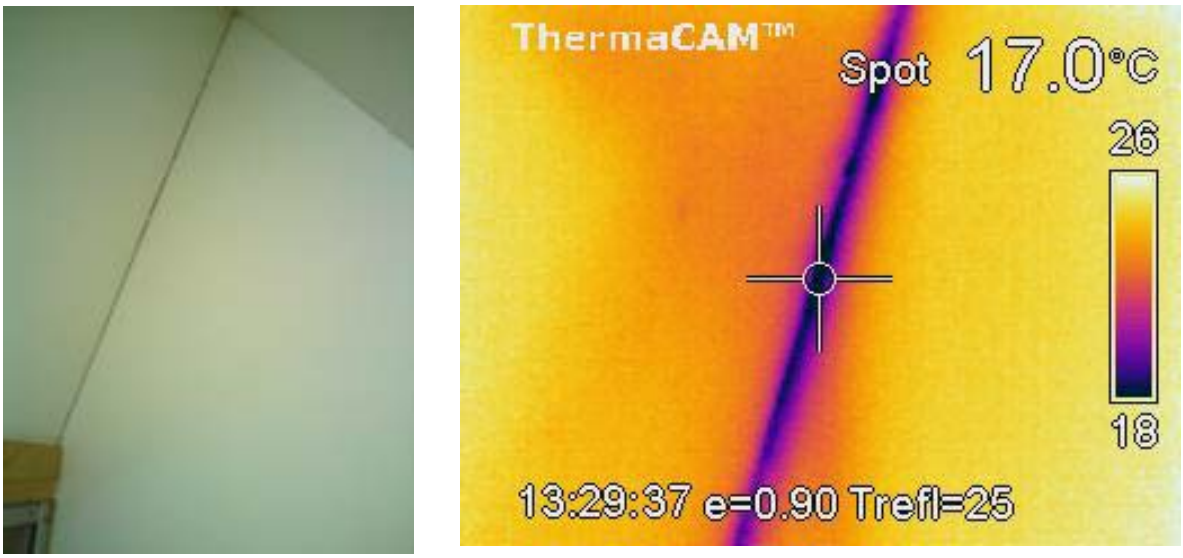
Det er mange hjørner på loftet, og flere av de kalde hjørnene har karakteristiske flammetunger som indikerer infiltrasjon.



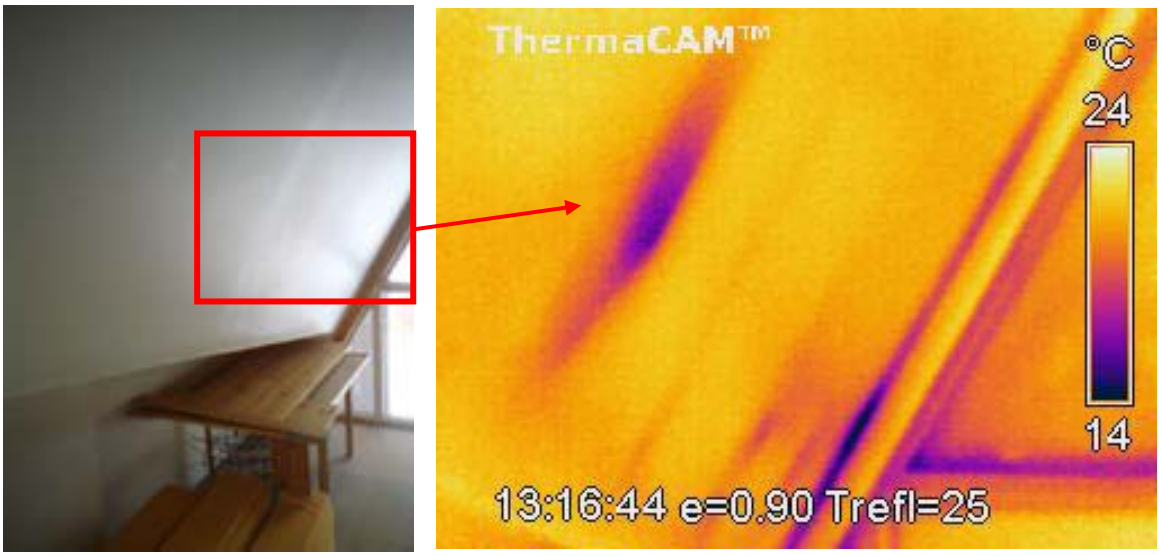
Figur 7.5.3 Vindu mot vest. Luftlekkasje nede til venstre under vindusrammen (01.02, -14 °C)



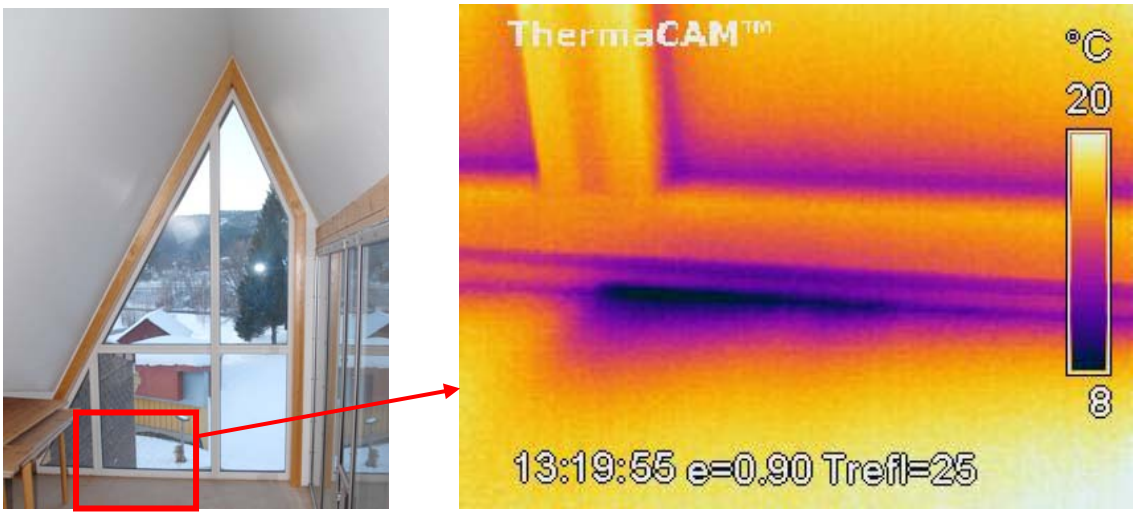
Figur 7.5.4 Luftlekkasje langs vegg. (17.03, 3 °C)



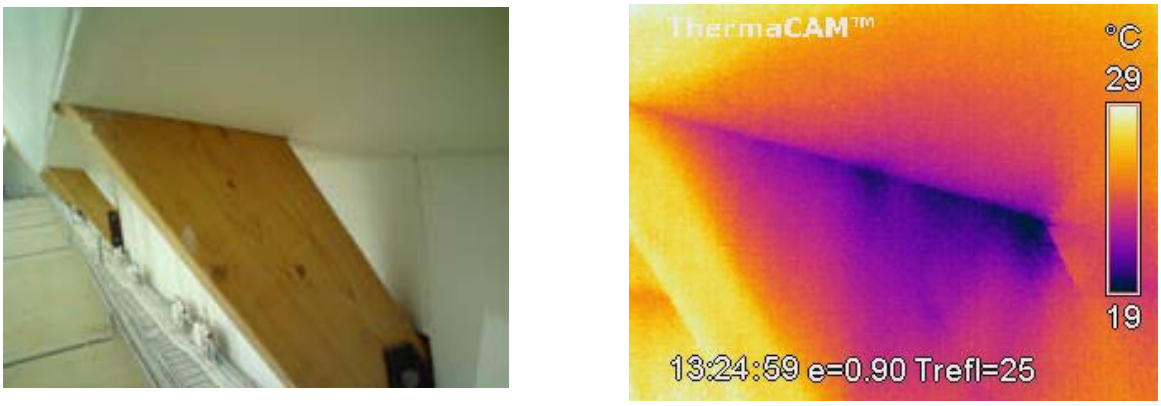
Figur 7.5.5 Kaldt område i hjørne. (17.03, 3 °C)



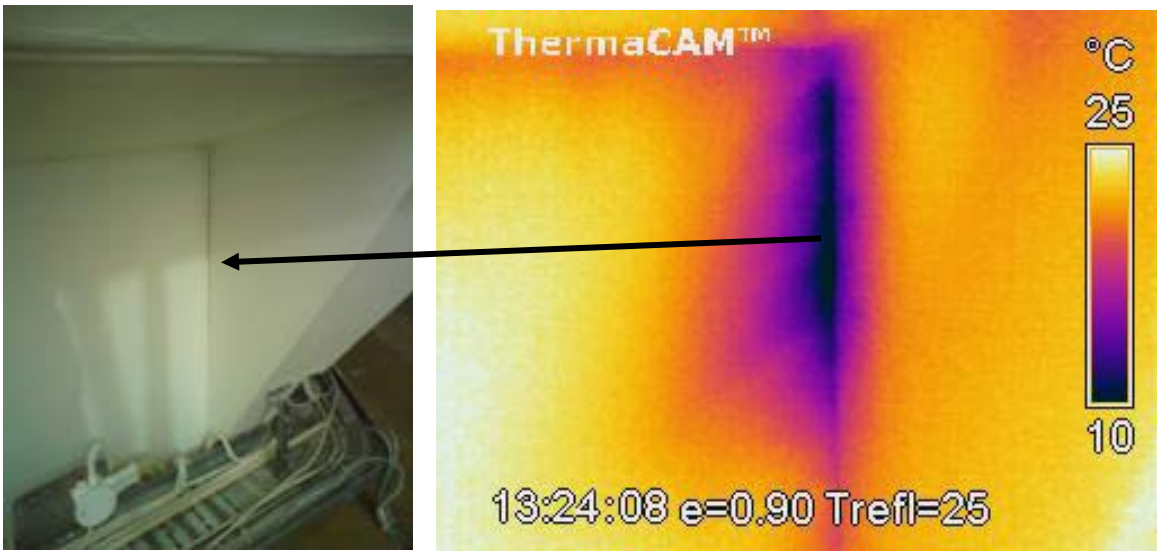
Figur 7.5.6 Kald flekk på vegg. Antagelig er det en kuldebro. Det virker usannsynlig at det er anblåsning, siden det en liten flekk der det ikke er spesielle trykkdifferanser som skulle kunne skape et drivtrykk for anblåsning.(17.03, 3 °C)



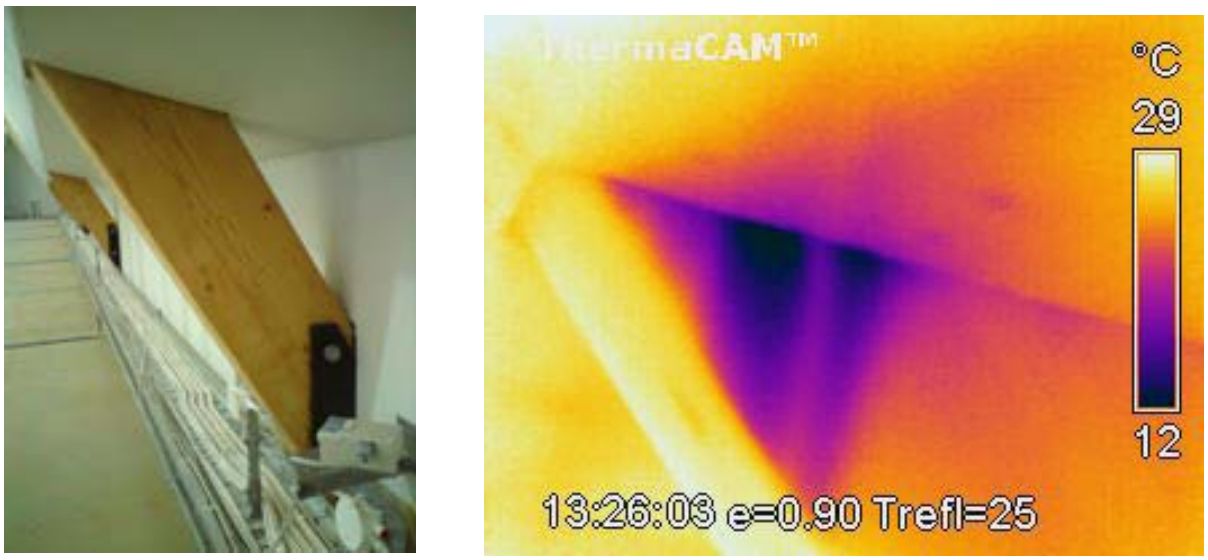
Figur 7.5.7 Luftlekkasje under vindu. (17.03, 3 °C)



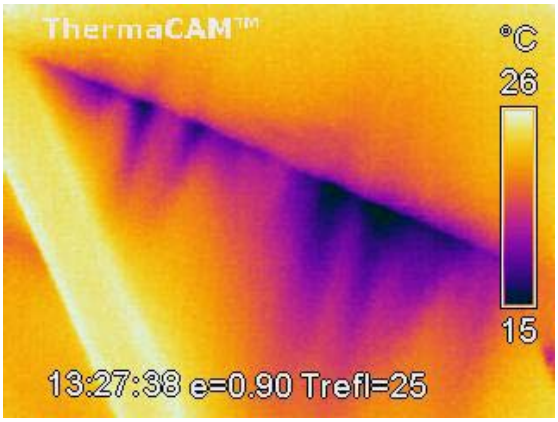
Figur 7.5.8 Luftlekkasje ved bjelke. (17.03, 3 °C)



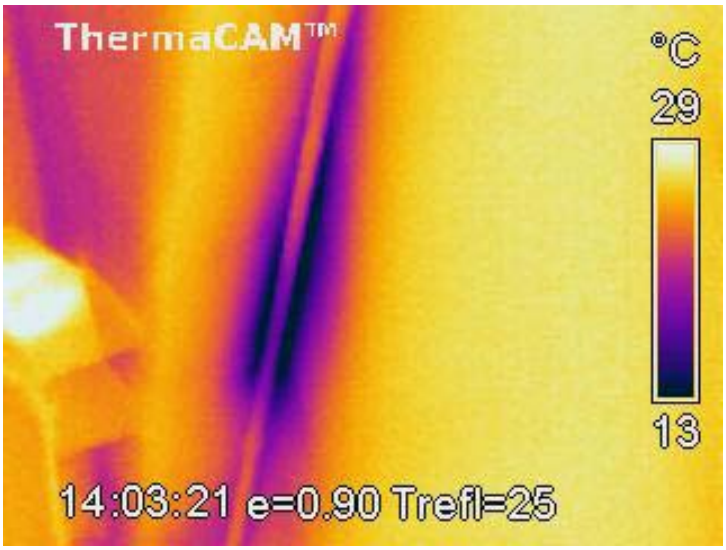
Figur 7.5.9 Luftlekkasje i sprekk. (17.03, 3 °C)



Figur 7.5.10 Luftlekkasje ved bjelke. (17.03, 3 °C)



Figur 7.5.11 Luftlekkasje ved bjelke. (17.03, 3 °C)



Figur 7.5.12 Luftlekkasje bak ledning. (17.03, 3 °C)

Utetemperaturen ble avlest til -14 °C kl. 16.30, en time etter at varmebildene ble tatt. På bakgrunn av en beregnet temperatur for loftsvinduet på 10 °C, Rsi for vinduer fra tabell 3.1 og en antatt lufttemperatur på 20 °C blir U-verdien for loftsvinduene 2,3 W/m^{2}K (ligning 7-11).

$$U_{vindu} = \frac{T_{inne} - T_{si}}{R_{si} \cdot (T_{inne} - T_{su})} = \frac{20 - 10}{0{,}13 \cdot (20 - (-14))} = 2{,}3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{(ligning 7-11)}$$

Det kan stemme bra, siden kravet i byggeforskriftene fra 1987 var at U-verdien til vinduene skulle være under 2,4 W/m^{2}K. Hvert vindu er 1,9m høyt og de 6 vinduene mellom hver bjelke er totalt 3,7 m lang. På loftet finnes det 14 slike vindusseksjoner med et samlet areal på 98 m^2. I tillegg er det et sidevindu på 5 m^2, slik at det samlede vindusarealet er ca. 100 m^2. Totalt sett fører vinduene til et effekttap på 230 W/K. Dersom det er en gjennomsnittlig temperaturforskjell på 25 °C, fører vinduene til et varmetap på 12600 kWh i den kaldeste fjerdedelen av året i følge ligning 7-12.

$$P_{tap} = 230 \, {}^{W}\!/_{K} \cdot 25K \cdot 7680 \, {}^{h}\!/_{år} \cdot 0{,}25 \text{ år} = 12\ 600 \text{ kWh} \quad \text{(ligning 7-12)}$$

7.6 Kjelleren

Tilluftstemperaturen til klasserommene var dimensjonert til å være 19 °C i oppvarmingssesongen, men to av dagene da skolen ble besøkt var temperaturen på kvikksølvtermometeret som hang på veggen i ca. 1,5 meters høyde på veggen ved lufttilførselen til distribusjonskjelleren 24 °C. En forklaring på det kunne vært at lufttemperaturen måtte være så høy for at luften som tilføres klasserommene gjennom kassene skulle bli 19 °C ved inntaket på kassene ved bakken i kjelleren. Av varmebilde 7.6.1 og 7.6.2 virker det som gulv-temperaturen under kassene er på rundt 24 °C.

Figur 7.6.1 Jevn temperatur på ca 24 °C i gang med tilluftskasser til rommene. 01.02(-12 °C)

Figur 7.6.2 Gang med tilluftskasser til rommene. I taket går rør til det vannbårne varmesystemet. Lysarmaturene i taket er ca. 32 °C og vannrørene er mellom 26 °C og 30 °C. 01.02(-12 °C)

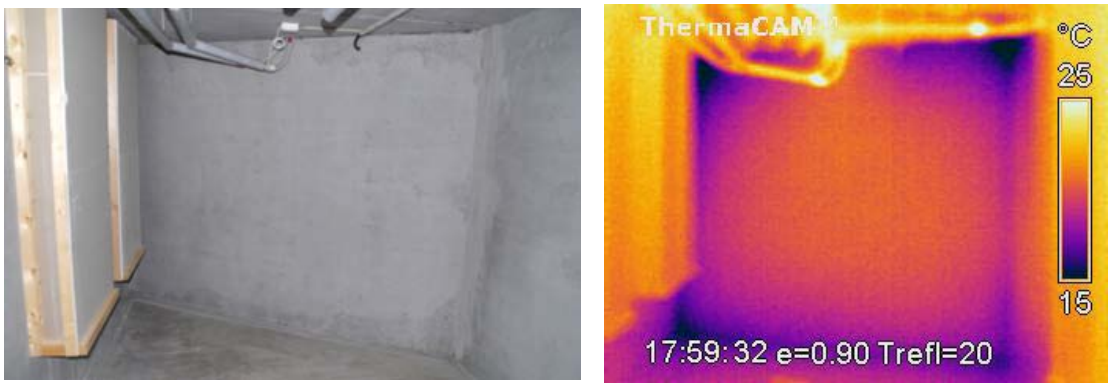
Det styrker mistanken om at tilluftstemperaturen er for høy, dersom man antar at lufttemperaturen er nær gulvtemperaturen. Det virker rimelig, siden betong har høy varmekapasitet og ventilasjonen går hele døgnet.

Termografi-kameraet i gjennomsnitt viser 1,4 °C for lav temperatur. Samtidig er emisjonsfaktoren stilt inn til 0,90 i alle varmebildene, mens emissiviteten til betong er 0,95. Resultatene fra tabell 1.4.1 viser at dersom emissiviteten hadde vært stilt til 0,95 ville den avleste temperaturen blitt omtrent 0,8 °C høyere. Gulvtemperaturen virker derfor å være rundt 24 °C under tilluftskassene.

Grunnen til at kassene er laget slik at luften strømmer inn ved gulvet er for å forhindre at lyd beveger seg fra et klasserom til et annet gjennom tilluftskanalene. Det fører imidlertid til økt varmetap til grunnen rundt distribusjonskjelleren når lufttemperaturen i kjelleren må være så

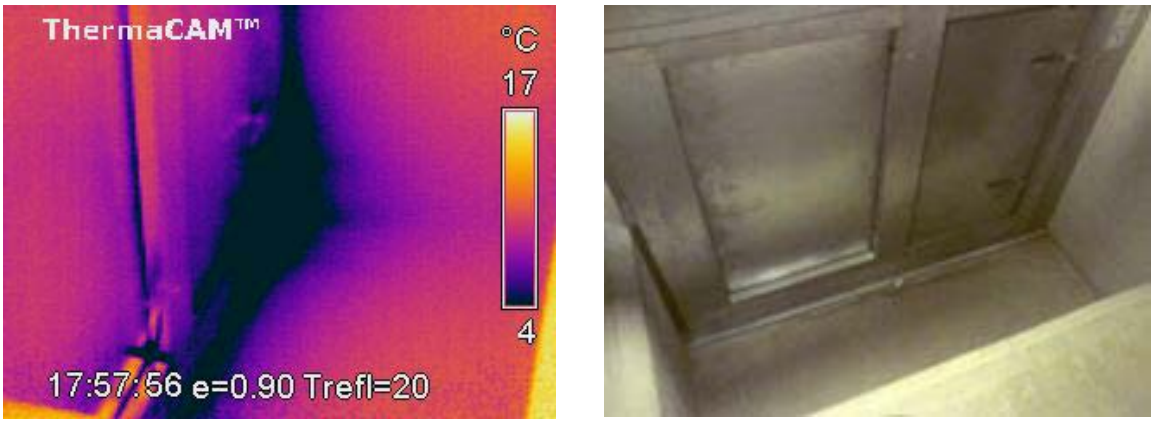
høy. I følge Tjelflaat(45) er det uheldig at tilluftstemperaturen økes over 19 °C. Det fører til kortslutningsventilasjon: Tilluften stiger rett til taket i klasserommet, der den trekkes av. Dermed vil CO_2-sensorene fortsette å rapportere at CO_2-nivået i klasserommet er for høyt og ventilasjonen vil økes. Fordi det oppstår kortsluttningsventilasjon blir det dårligere luftkvalitet i pustesonen og økte energikostnader til vifter og oppvarming av ventilasjonsluft.

Det ble ikke oppdaget noen kuldebroer i distribusjonskjelleren, bortsett fra i hjørnene ved den ene endeveggen(figur 7.6.3). Her mistenkes det at de kalde hjørnene skyldes kuldebroer.

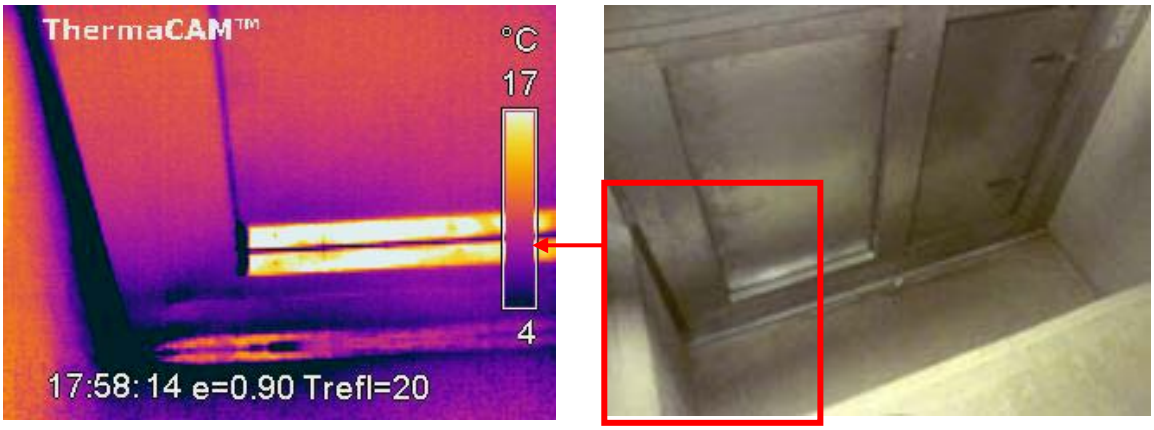


Figur 7.6.3 Endevegg i kjellergang for lufttilførsel. 01.02(-12 °C)

Figur 7.6.4 og 7.6.5 antyder at det er lekkasje av kald ventilasjonsluft nede mellom metallrammen og betongen i varmegjenvinneren. Den kalde luften skulle heller gått gjennom gjenvinneren før den ble tilført i distribusjons-kjelleren.



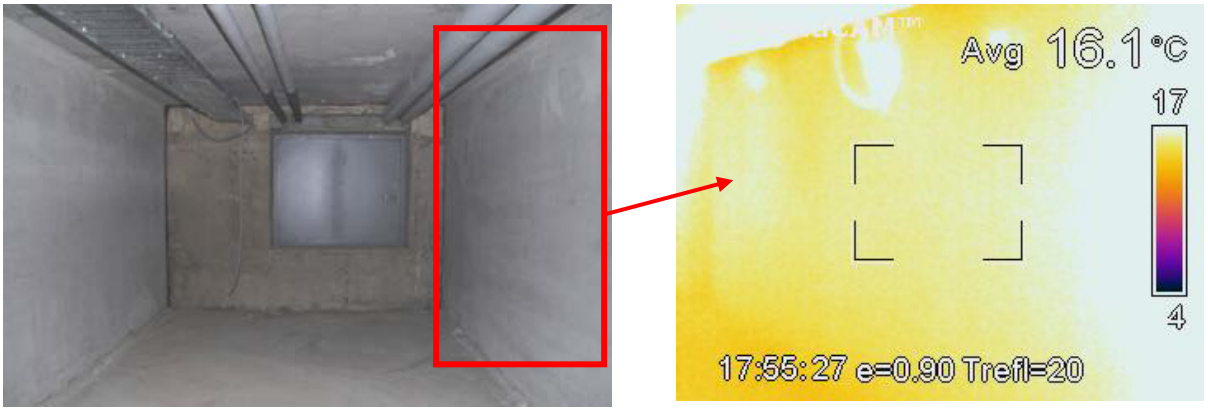
Figur 7.6.4 Luftlekkasje rundt varmegjenvinneren for ventilasjonsluft. 01.02(-12 °C)



Figur 7.6.5 Luftlekkasje rundt varmegjenvinneren for ventilasjonsluft. 01.02(-12 °C)

Figur 7.6.6 Gulv i enden av distribusjons-kjelleren. 22.02(-17 °C)

Figur 7.6.7 Endevegg i enden av distribusjons-kjelleren. 22.02(-17 °C)



Figur 7.6.8 Høyre vegg i enden av distribusjons-kjelleren. 22.02(-17 °C)

Figur 7.6.7-9 viser at veggtemperaturen i enden av distribusjons-kjelleren for ventilasjonsluft nærmest ungdomsskolen er rundt 16 °C og gulvtemperaturen er rundt 13 °C. Grunnen til at det er kaldere her, er at enden av kjellergangen stikker utenfor bygget(figur 7.2.1). I tillegg er lufttilførselen redusert ved at det er bygget en murvegg fra gulvet til taket som dekker halve bredden av kjellergangen. Denne delen av kjelleren fører vannbåren varme over fra ungdomsskolen. Pumpene til det vannbårne varmesystemet er også plassert her.

Figur 7.6.9 Venstre vegg i enden av kjellergang for lufttilførsel. 22.02(-17 °C)

Varmerørene i taket som forsyner radiatoranlegget avgir noe varme til tilluften. Figuren viser at de holder en temperatur på rundt 31 °C. Varmen som avgis fra rørene i det vannbårne varmesystemet kommer til nytte fordi den varmer opp ventilasjonsluften. Så lenge varmeanlegget går, er det oppvarmingsbehov i bygget.

7.6.1 U-verdien for kjellergulvet

Siden det er vanskelig å anslå U-verdien for kjellergulvet på bakgrunn av temperaturmålingene, siden temperaturen i grunnen er ukjent, regnes den forventede U-verdien for kjellergulvet uten kuldebroer, $U_{0,bf}$, ut etter NS-EN ISO 13370:2007(88).

Hjørnene mellom kjellergulvet og kjellerveggen kan være en kuldebro på grunn av at utvendig overflateareal er større enn innvendig overflateareal, men for å forenkle beregningen er tillegget i U-verdien på grunn av kuldebroen ikke regnet ut. Dessuten virker det ikke som om hjørnene er en kuldebro ut fra varmebildene i figur 7.6.1-2.

Tabell 7.6.1 Beregning av kjellergulvets varmemotstand

Sjikt	d [mm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
Innvendig varme-overgangsmotstand			0,17(tab 3.1)
Betong	100	2,00	0,061
Plastfolie	0,2		0,030(89)
Totalt			**0,261**

Fra kapittel 5.1.1 er følgende gitt:

Lengden av kjeller, l = 30 m(2 fløyer på 15m)
Bredden av kjelleren, b= 1,5 m
Total tykkelse på kjellergulvet w = 0,10 m

Gulvarealet, A_{netto} , regnes ut på bakgrunn av innvendig lengde og bredde i ligning 7-13.(90)

$$A_{netto} = l \cdot b = 45\ m^2 \qquad \text{(ligning 7-13)}$$

Brutto areal av gulvet inkluderer gulvarealet under ytterveggene i kjelleren. Veggene er 0,20 meter tykke. Bruttoarealet er regnet ut i ligning 7-14.

$$A_{brutto} = A_{netto} + 0,20m \cdot (1,5m \cdot 2 + 15m \cdot 2) = 57,6\ m^2 \qquad \text{(ligning 7-14)}$$

P er omkretsen av ytterveggen i kjelleren, målt fra utsiden av ytterveggen.(91) Siden lengden og bredden er målt på innsiden legges det til 2 ganger tykkelsen av kjellerveggen for hvert hjørne i utregningen av P i ligning 7-15.

$$P=2\cdot l+2\cdot b+0{,}15\cdot 8=64{,}2\ \text{m} \qquad \text{(ligning 7-15)}$$

Konduktiviteten til grunnen, λ, skal i følge NS-EN ISO 13370 settes lik 2W/mK dersom jordens sammensetning er ukjent.(92) Wachenfeldt mente at skolen var bygget på leirjord og brukte derfor en konduktivitet på 1,28 W/mK for grunnen. Selv om grunnens egenskaper aldri ble testet i virkeligheten, stemte simuleringene bedre med det målte energiforbruket når grunnen ble regnet som leirjord. Derfor settes λ =1,28 W/mK.(93)

Den karakteristiske dimensjonen for gulvet B' er gitt av ligning 7-16.

$$B' = \frac{A_{\text{brutto}}}{0{,}5\cdot P} = \frac{57{,}6}{0{,}5\cdot 64{,}2} = 1{,}794\ \text{m} \qquad \text{(91) (ligning 7-16)}$$

Ekvivalent tykkelse, d_t , innføres for å gjøre uttrykket for beregning av transmittans enklere. d_t er den ekvivalente tykkelsen for gulvet, den tykkelsen grunnen må ha for å få samme termiske motstand. d_t er gitt av ligning 7-17.

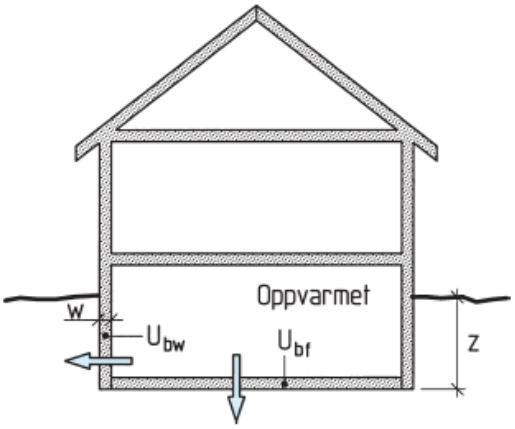
$$d_t = w+\lambda\cdot\left(R_{si}+R_t+R_{se}\right)=0{,}15+1{,}28\cdot 0{,}261=0{,}4841\ \text{m}$$

(94) (ligning 7-17)

U-verdien for kjellergulvet, $U_{0,\text{bf}}$, er nå gitt av ligning 7-18.

$$\left(d_t+0{,}5\cdot z\right)<B'\Rightarrow U_{0,\text{bf}}=\frac{2\cdot\lambda}{\pi\cdot B'+d_t+0{,}5\cdot z}\cdot\ln\left[\frac{\pi\cdot B'}{d_t+0{,}5\cdot z}+1\right]$$

(94) (ligning 7-18)



z er den vertikale avstanden fra bakken utenfor bygget til toppen av kjellergulvet(figur 7.6.10)
z settes lik høyden i kjelleren som er 2 m.

Figur 7.6.10 Størrelser i beregning av U-verdi

$$U_{0,\text{bf}} = \frac{2 \cdot 1,28}{\pi \cdot 1,794 + 0,4841 + 0,5 \cdot 2} \cdot \ln\left[\frac{\pi \cdot 1,794}{0,4841 + 0,5 \cdot 2} + 1\right] = 0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Den beregnede U-verdien for kjellergulvet er langt over kravet til U-verdien for gulv mot grunn, selv uten at effekten av eventuelle kuldebroer er inkludert. Kravet til U-verdi for gulv mot grunn har gått ned fra 0,30 W/m^{2}K i 1987 til 0,15 W/m^{2}K i 2007. Siden distribusjonskjelleren for ventilasjonsluft er oppvarmet, burde den vært isolert etter kravene til gulv mot grunn.

7.6.2 U-verdien for kjellerveggen

Tabell 7.6.2 Beregning av kjellerveggens varmemotstand

Sjikt	d [mm]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]
Innvendig varme-overgangsmotstand			0,13(tab 3.1)
Betong	150	2,00	0,061
Plastfolie	0,2		0,030(89)
Isolasjon, EPS	50	0,035	1,429
Totalt			**1,650**

U-verdien for kjellerveggen uten kuldebroer er gitt av ligning 7-19..

$$U_{0,\text{bw}} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot d_t}{d_t + z}\right) \ln\left[\frac{z}{d_w} + 1\right] \qquad \text{(95)(ligning 7-19)}$$

Ligning 7-19 er gyldig hvis $d_w \geq d_t$.(95)

$$d_w = \lambda \cdot \left(R_{si} + R_w + R_{se}\right) = 1,28 \cdot 1,650 = 2,112\text{m} \qquad \text{(96) (ligning 7-20)}$$

Fordi $d_w > d_t$ ut fra ligning 7-20 er ligning 7-19 gyldig.

$$U_{0,\text{bw}} = \frac{2 \cdot 1,28}{\pi \cdot 2} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,4841}{0,4841 + 2}\right) \ln\left[\frac{2}{2,262} + 1\right] = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$$

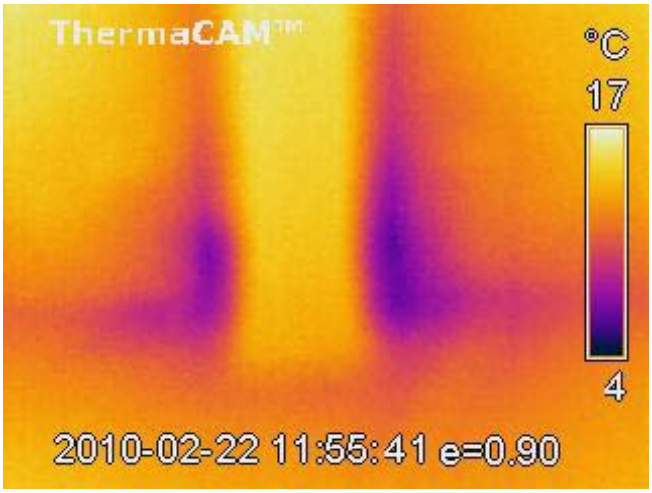
(ligning 7-21)

Kjellerveggen har en U-verdi på 0,28 W/m^{2}K ut fra ligning 7-21. Siden kjellerveggen ikke avkjøles ved konveksjon av uteluften, men gjennom konduksjon mot grunnen, er det mer naturlig å sammenligne U-verdien mot kravene for U-verdi for gulv mot grunn enn mot kravene til U-verdi for yttervegg. Dersom den beregnede U-verdien for kjellerveggen er riktig, oppfyller veggen kravene til U-verdi for gulv mot grunn i byggeforskriftene fra 1987. Kravene i dagens byggeforskrift er imidlertid U= 0,15 W/m^{2}K .

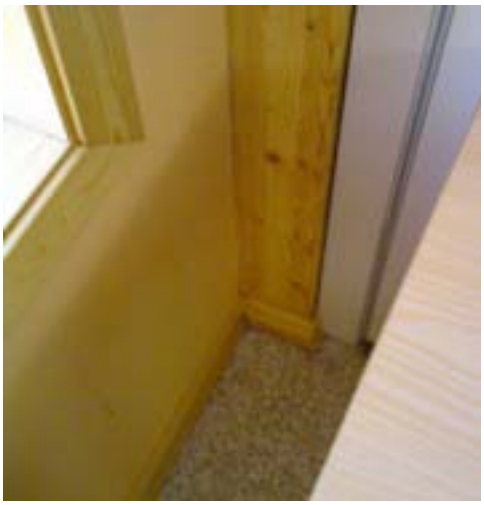
7.7 Klasserommene

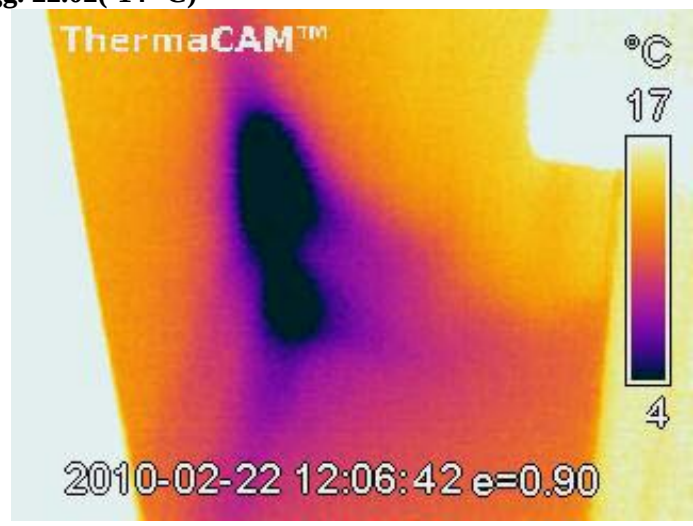
Termograferingen av klasserommene viser at de kalde områdene er rundt vindusrammene i ytterveggen(figur 7.7.6-9), i hjørnene nede langs gulvet(figur 7.7.5) og nederst langs gulvet på siden av veggstolpene mot ytterveggen(figur 7.7.1-4). Bildene er tatt i klasserom 119 og 122, men funnene var de samme i de andre klasserommene. Klasserom 122 ligger mellom to andre klasserom, mens i klasserom 119 er høyre sidevegg yttervegg. Det ble ikke oppdaget noen kuldebroer langs taklistene eller takbjelkene slik Wachenfeldt antydet(63). Det er vanskelig å si sikkert om de kalde områdene skyldes kuldebroer eller infiltrasjon.

Hjørner er vanligvis kaldere enn resten av rommet på grunn av redusert luftsirkulasjon og liten strålingsutveksling med resten av rommet. Temperaturene i hjørnene i figur 7.7.2 og 7.7-4-5 er imidlertid såpass mye lavere enn romtemperaturen, at det ikke kan ansees som normalt.

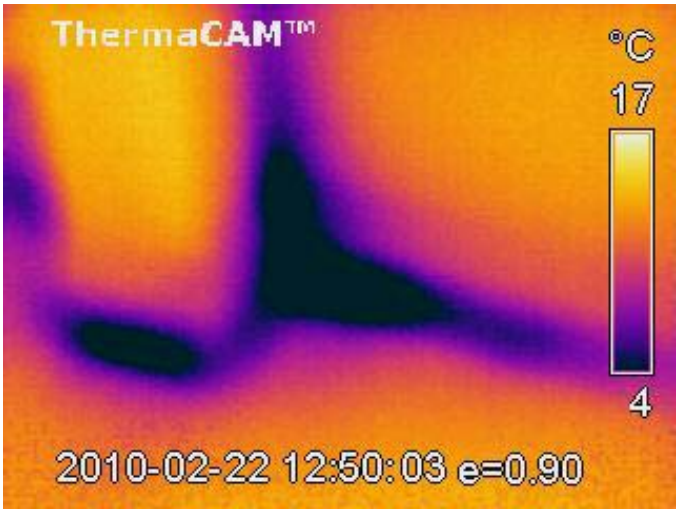


Figur 7.7.1 Veggstolpe sentralt i klasserom 122. Kaldt område på siden av stolpen. Mistanke om kuldebro gjennom yttervegg. 22.02(-14 °C)

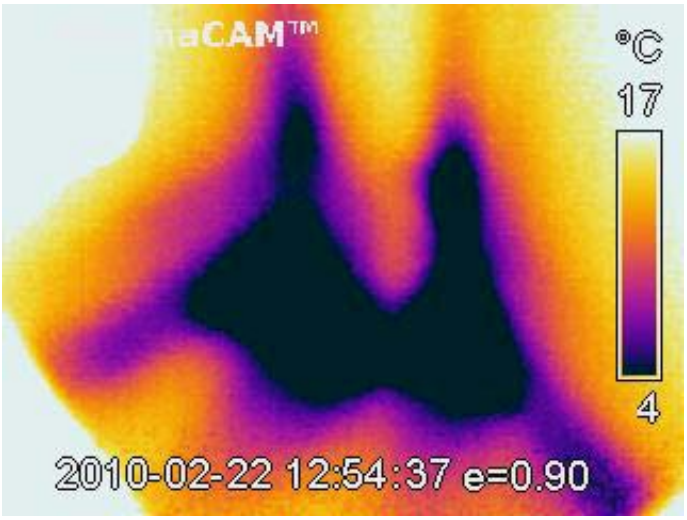


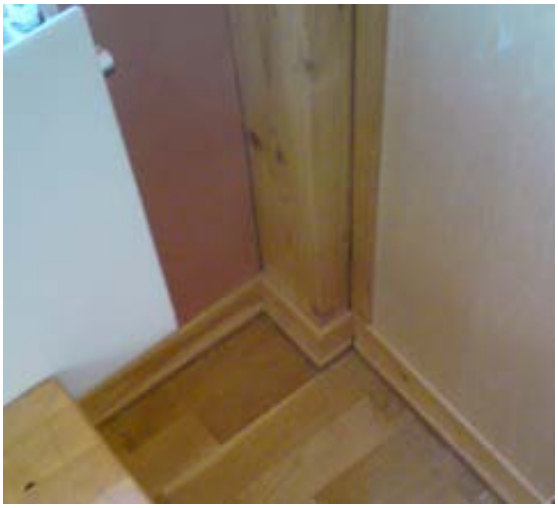


Figur 7.7.2 Kaldt område til venstre mellom veggen og hjørnestolpen i klasserom 122. Veggen til venstre for stolpen er yttervegg, mens veggen til høyre er sidevegg mot et annet klasserom. Varmebildet viser at det er minst 10 graders temperaturdifferanse mellom vegg og hjørne. Mistanke om infiltrasjon, siden ventilasjonsanlegget vil skape et lite undertrykk som øker faren for infiltrasjon. 22.02(-14 °C)

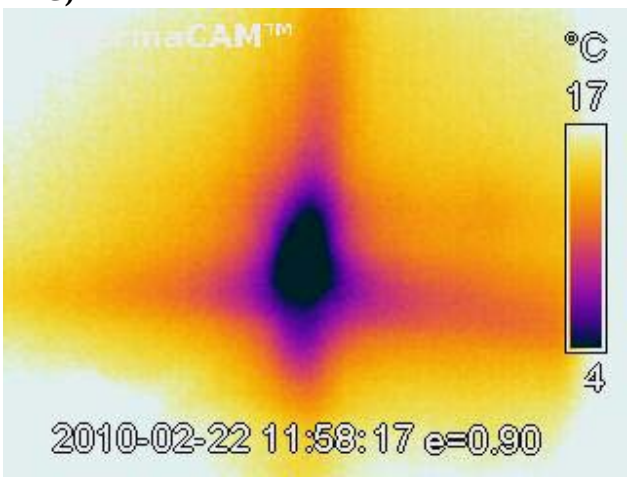


Figur 7.7.3 Kaldt område nederst rundt veggstolpen midt i klasserom 119 på yttervegg mot nordøst. Kan skyldes infiltrasjon, siden det først og fremst er kaldt nederst rundt stolpen og ikke på selve stolpen. 22.02(-14 °C).

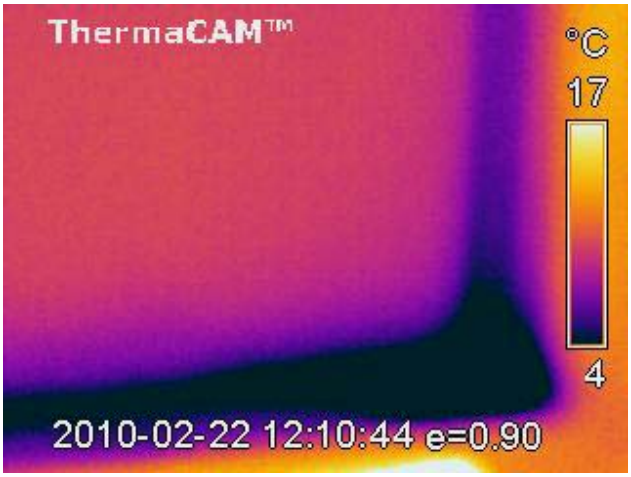




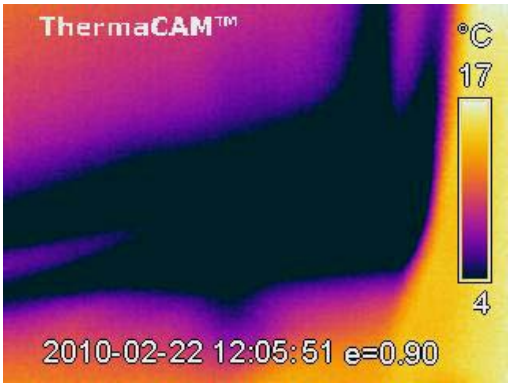
Figur 7.7.4 Kaldt område rundt hjørnestolpen i klasserom 119 mellom to ytterveggen mot nordvest og sørøst. Varmebildet viser at hjørnet er minst 10 grader kaldere enn veggen og gulvet rundt. 22.02(-14°C)



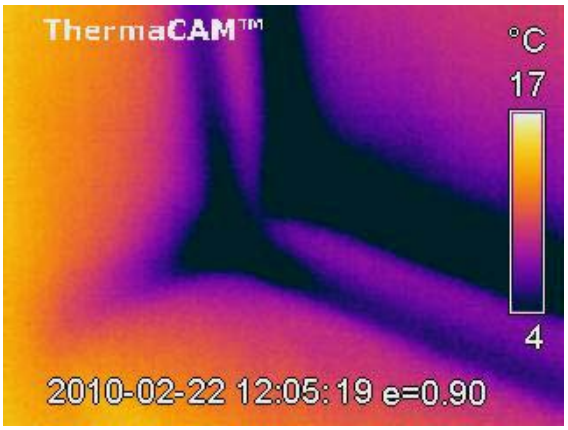
Figur 7.7.5 Kaldt område i hjørne i klasserom 122. Veggen til venstre er sidevegg mot et annet klasserom, mens veggen til høyre for hjørnet er yttervegg. 22.02(-14 °C). Det ser ut som det kalde området skyldes infiltrasjonen på grunn av jetene på hver side av den kalde området.



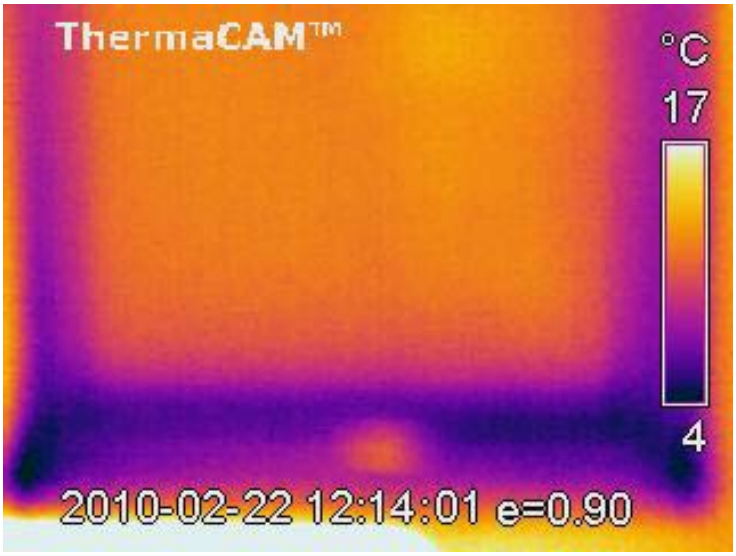
Figur 7.7.6 **Vindu over radiator i klasserom 122. Vindusrammene ser ut til å være en kuldebro. Selv om det er normalt, er det tydelig kaldere nede til høyre langs vinduet i forhold til midt på. Derfor mistenkes infiltrasjon. 22.02(-14 °C)**



Figur 7.7.7 **Vinduskarmen i vinduet i høyre hjørnet av klasserom 122 er kaldere enn vinduskarmen i figur 8.8, som er termografert fra omtrent samme vinkel. Mistanke om kuldebro og luftlekkasje. Nede midt i bildet det ser ut til å være en jet. 22.02(-14 °C)**

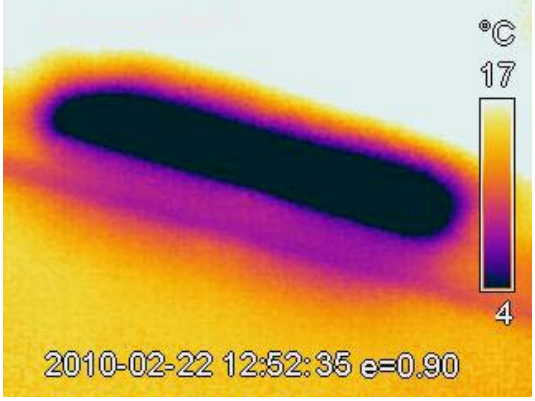


Figur 7.7.8 **Mistanke om luftlekkasje i venstre hjørnet mellom vindusrammen og vinduskarmen i klasserom 122 på grunn av jet-formen på det kalde området. 22.02(-14 °C)**

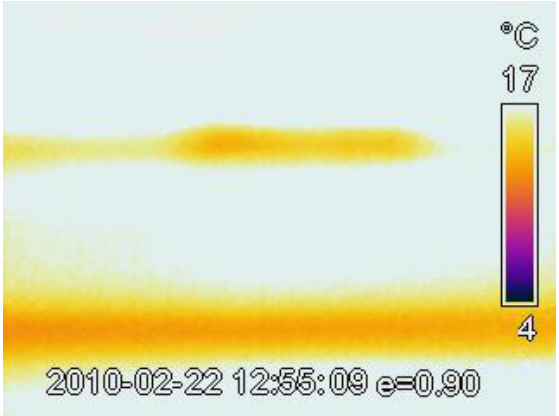


Figur 7.7.9 Vindu over radiator i klasserom 122. Vinduet virker å være bra, men radiatoren skulle helst hatt romtemperatur under termografering. På grunn av varmestrømmen fra radiatoren kan vinduet se bedre ut enn det egentlig er. 22.02(-14 °C)

I klasserom 119 stod den ene ventilen over et av vinduene åpen. Det kom tydelig fram i varmebilde 7.7.10, i motsetning til en tilsvarende lukket ventil som knapt var synlig i figur 7.7.11. Begge ventilene står på samme yttervegg, like ved siden av hverandre. Varmebildene viser at så lenge ventilene er lukket, er de ingen kuldebro.

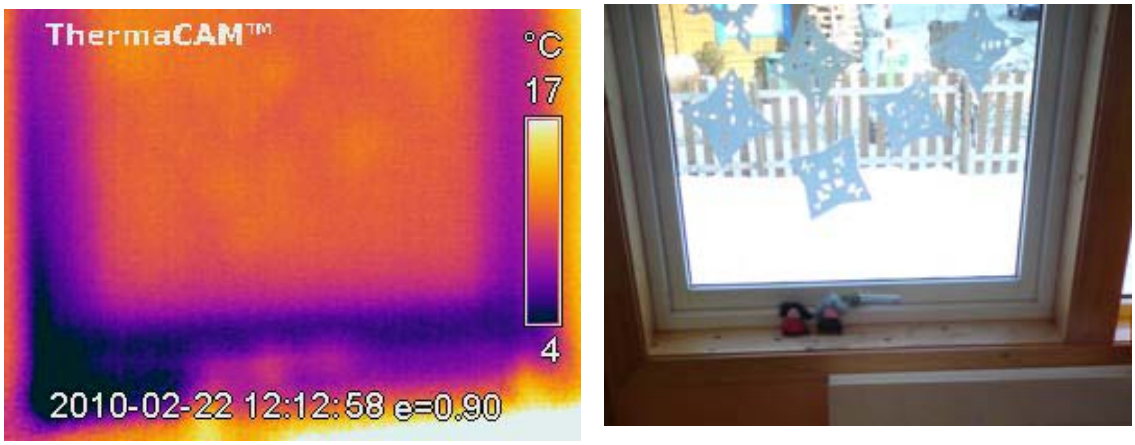


Figur 7.7.10 Kald trekk gjennom åpen vindusventil i yttervegg mot nordøst i klasserom 119. 22.02(-14 °C)

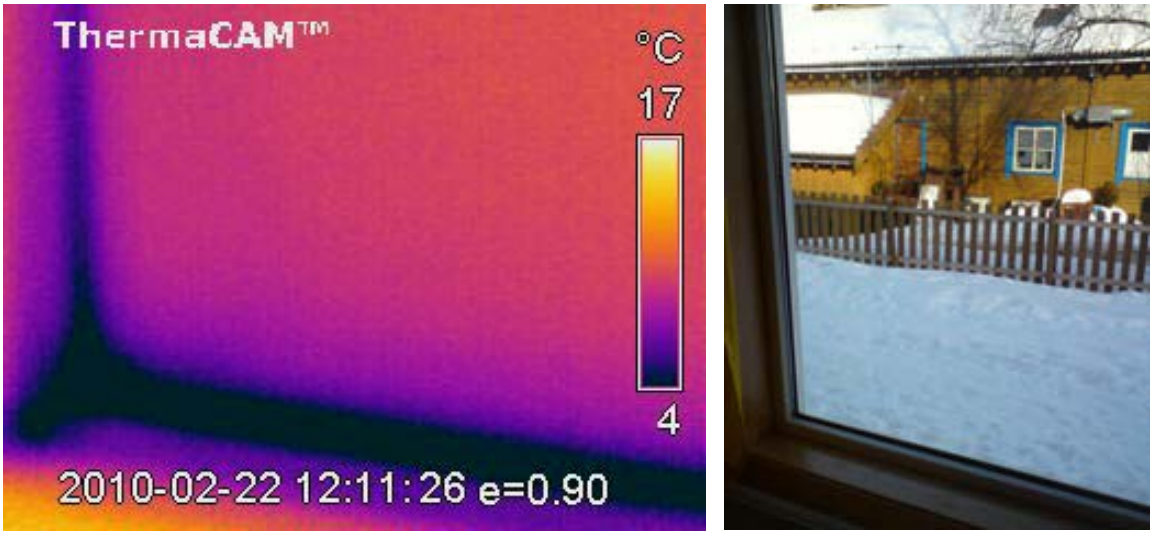


Figur 7.7.11 Lukket vindusventil i yttervegg mot nordøst i klasserom 119. 22.02(-14 °C)

Vindusrammene var generelt sett kalde, slik figur 7.7.6 viser. Vindusrutene i figur 7.7.6-8 og 7.7.12-13 virker å ha en temperatur på rundt 10 °C, mens vindusruten i figur 7.7.9 virker å være 12 °C. Vinduene med ramme anslås å ha en gjennomsnittstemperatur på 10 °C, mens lufttemperaturen inne antas å ha vært 20 °C, som er settpunktet.



Figur 7.7.12 Vindu i klasserom 122. Temperaturen på vindusruten virker å være rundt 10 °C. 22.02(-14 °C)



Figur 7.7.13 Vindu i klasserom 122. Temperaturen på vindusruten virker å være rundt 10 °C. 22.02(-14 °C)

$$U_{vindu} = \frac{20-10}{0{,}13\cdot(20-(-14))} = 2{,}1\ \mathrm{W/m^2K} \qquad \text{(ligning 7-22)}$$

U-verdien til vinduene, som er beregnet i ligning 7-22, virker å være bra, men det er stor usikkerhet i beregningen. Kravene til U-verdi for vindu i byggeforskriften fra 1987 var under $2{,}4\ \mathrm{W/m^2K}$.

En spørreundersøkelse utført av Tjelflaat(97) i klasserommene 126 og 124 viser at elevene ikke opplevde problemer med trekk fra vinduene.

Det ble ikke oppdaget noe infiltrasjon mellom ytterveggene i klasserommene og ringmuren, slik Wachenfeldt antydet, men det er likevel mulig at det er infiltrasjon her. Ved normal trykkdifferanse mellom ute og inne, er infiltrasjonen imidlertid ikke synlig på varmebildene.

7.7.1 U-verdien til gulv mot grunn

U-verdien til gulv mot grunn er beregnet for klasserom 122 etter NS-EN ISO 13370:2007.(88)

Konduktiviteten til EPS er oppgitt i Annex A i ISO 10456:2007 for isolasjonstykkelser på 40 mm og 100 mm. Ved hjelp av lineær interpolasjon finnes konduktiviteten ved en isolasjonstykkelse på 50 mm(ligning 7-23)

$$\lambda(40mm) = 0,032 \text{ W/mK}$$

$$\lambda(100mm) = 0,050 \text{ W/mK}$$

$$\lambda(50mm) = 0,050 + \frac{0,050 - 0,032}{100 - 40} \cdot (50 - 100) = 0,035 \text{ W/mK} \qquad \text{(ligning 7-23)}$$

Siden betonggulvet i klasserommene er bygget opp av en tung betongblanding, settes λ=2,00 som for ”High density concrete”.(98) Det antas at det er en plastfolie mellom betongen og isolasjonen.

Tabell 7.7.1 Beregning av varmemotstanden for gulv mot grunn

Sjikt	d [mm]	λ [W/mK]	R [m^2K/W]
Innvendig varme-overgangsmotstand			0,17(tab 3.1)
Gulvbelegg av PVC	3	0,17(99)	0,018
Betong	100(49)	2,00(98)	0,061
Plastfolie	0,2		0,030(89)
Isolasjon, EPS	50	0,035	1,429
Totalt			**1,708**

Lengden av klasserommet(fra midt i vegg til midt i vegg), l = 7,80 m(100)
Bredden av klasserommet(fra midt i vegg til midt i vegg), b= 7,70 m(100)
Total tykkelse på ytterveggen w = 0,174 m(kapittel 5.1.2)

$$A_{\text{brutto}} = l \cdot b = 60,06 \text{ m} \qquad \text{(ligning 7-24)}$$

For å gjøre et raskt overslag over nettoarealet på bakgrunn av bruttoarealet, brukes forholdet mellom netto- og bruttoarealet fra et tilsynelatende realistisk regneeksempel.(89) Nettoarealet blir 54,6 m^2, ut fra ligning 7-25.

Netto areal av gulvet $A_{\text{netto}} = A_{brutto} / 1,10 = 54,6 \text{ m}^2$ (ligning 7-25)

Når varmetapet for et enkelt rom regnes ut, er P lengden på yttervegger. P er 7,8 m.(91)

λ =1,28 W/mK som i beregningen for kjellergulvet i kapittel 7.6.1

Den karakteristiske dimensjonen for gulvet B' er gitt av ligning 7-26.

$$B' = \frac{A_{brutto}}{0,5 \cdot P} = \frac{60,06}{0,5 \cdot 7,8} = 15,4 \text{ m}$$ (91)(ligning 7-26)

Den ekvivalente tykkelsen for gulvet, d_t , er gitt av ligning 7-27.

$$d_t = w + \lambda \cdot \left(R_{si} + R_t + R_{se}\right) = 0,174 + 1,28 \cdot 1,708 = 2,360 \text{ m}$$

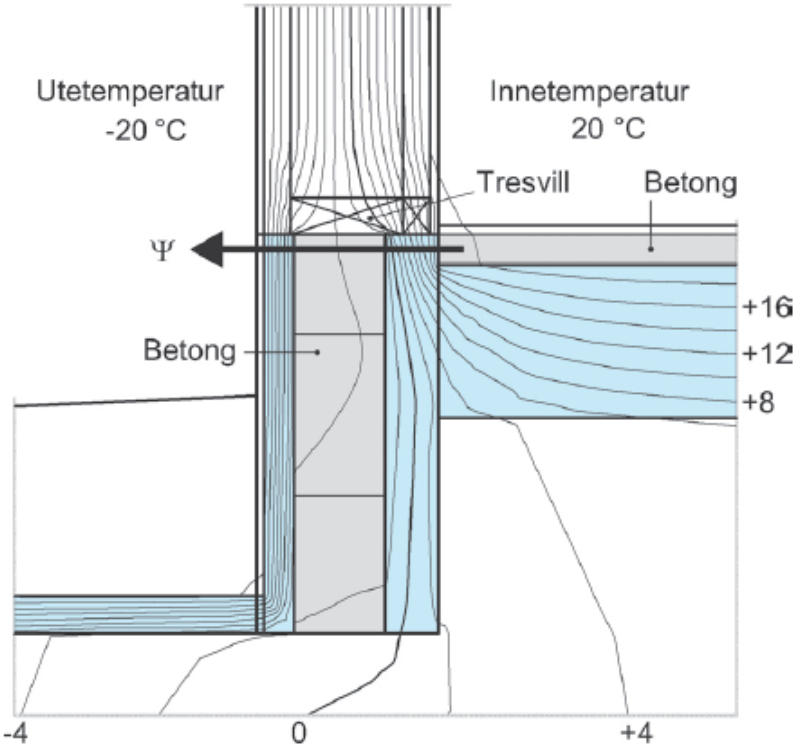
(101)(ligning 7-27)

U-verdien for gulvet mot grunn i klasserommet, når virkningen av kuldebroer er sett bort fra, blir regnet ut i ligning 7-29, basert på ligning 7-28.

$$d_t < B' \Rightarrow U_0 = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B' + d_t} \cdot \ln\left[\frac{\pi \cdot B'}{d_t} + 1\right]$$ (101)(ligning 7-28)

$$U_0 = \frac{2 \cdot 1,28}{\pi \cdot 15,4 + 2,362} \cdot \ln\left[\frac{\pi \cdot 15,4}{2,362} + 1\right] = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$$ (ligning 7-29)

I tillegg kommer et ekstra effekttap på grunn av kuldebrovirkningen i ringmurstoppen. Siden ringmuren ikke er isolert både utvendig og innvendig, er overgangen mellom ringmuren og gulvet en kuldebro(figur 7.7.14).(102)



Figur 7.7.14 Eksempel på gulv mot grunn ved en utetemperatur på -20 °C. Isotermene viser at det er tilnærmet endimensjonal varmestrøm gjennom ringmurstoppen.(102)

Kuldebroverdien, ψ_i, er gitt av ligning 7-30.

$$\psi_i = a/R_{total} = 0{,}10/1{,}708 = 0{,}059 \text{ W/mK} \quad (102) \quad \text{(ligning 7-30)}$$

a er tykkelsen på gulvkonstruksjonen over isolasjonen, som her blir tykkelsen av betongen i gulvet.(102)

U-verdien kan nå beregnes fra ligning 2-1. Lengden på kuldebroer blir lik lengden på ytterveggen med ringmur i klasserom 122. Den er 7,8 m.

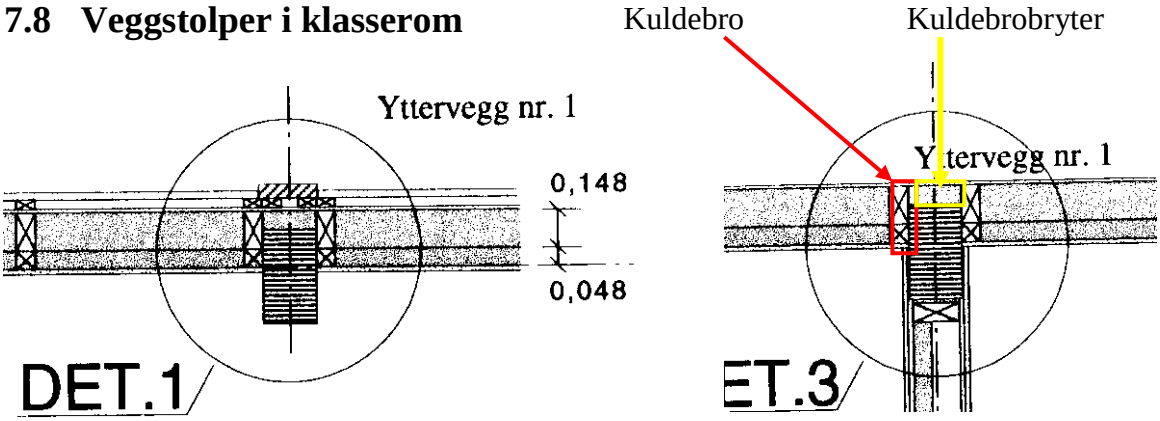
$$\mathrm{U}_l = \frac{1}{A_{netto}} \sum \psi_i \cdot l_i = 1/54{,}6 \cdot 0{,}059 \cdot 7{,}8 = 0{,}008 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{(ligning 7-31)}$$

Kuldebroverdien, som er beregnet i ligning 7-30, er høy. Men siden lengden av kuldebroen er liten i forhold til arealet av rommet, blir kuldebroen neglisjerbar i beregningen av gulvets U-verdi.

$$U = U_0 + U_l = 0{,}15 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{(ligning 7-32)}$$

Den beregnede U-verdien i ligning 7-32, med standard verdi for kuldebroer, blir 0,15 $\text{W/m}^2\text{K}$. Kravet til U-verdi for gulv mot grunn i byggeforskriften fra 1987 på 0,30 $\text{W/m}^2\text{K}$ (tabell 5.2.3). Gulvet virker derfor å være svært bra i forhold til tiden det ble bygget på. Samtidig er det usikkert hvor riktig modellen i NS 13370 ”Bygningers termiske egenskaper - Varmeoverføring via grunnen – Beregningsmetoder”, som er brukt i beregningen av U-verdi, er når den brukes på et enkelt rom. I tillegg er konduktiviteten til grunnen usikker. Dersom konduktiviteten setter til 2 W/mK, slik det anbefales i standarden dersom konduktiviteten er ukjent, ville U-verdien blitt 0,21 $\text{W/m}^2\text{K}$. Gulvet mot grunn i klasserommet ser ut til å oppfylle kravene i dagens standard på 0,15 $\text{W/m}^2\text{K}$ til tross for at det bare er 5 cm isolasjon i gulvet. Årsaken er at varmemotstanden i grunnen gir en isolerende virkning.

7.8 Veggstolper i klasserom



Figur 7.8.1 **Oppbygningen av veggen rundt veggstolpe midt på vegg(venstre) og ved vegg mellom to klasserom(høyre).(100)**

I klasserommene er det veggstolper, som vist i figur 7.8.2 og i bygningstegningen i figur 7.8.5. Figur 7.8.1 viser at det er en kuldebrobryter på anslagsvis 50 mm mellom ytterkledningen og veggstolpen. Men på siden av veggstolpen er det gjennomgående trevegg utenfra og inn. Som figur 7.7.1 viser, er det litt kaldere langs siden av veggstolpene. Treverk leder imidlertid ikke varme så godt at det blir noen vesentlig kuldebro. Sannsynligvis er årsaken til at det er kaldt i hjørnet ved veggstolpen i figur 7.7.1 vel så mye at luftsirkulasjonen er dårligere her.

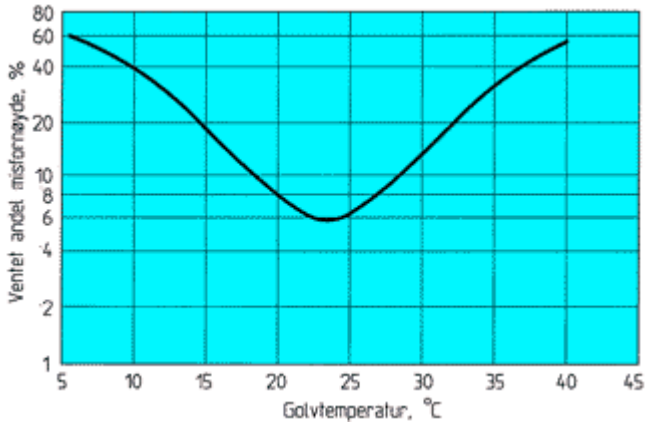
Figur 7.8.2 Veggstolpe i klasserom

Professor Per Olaf Tjelflaat, som var ansvarlig for å prosjektere ventilasjonssystemet, husker imidlertid at det ble sagt i ettertid at det var kommet ytterligere kuldebroer som følge av at bygningstegningene ikke ble fulgt nøyaktig.(45) Det er tydelig på varmebildene 7.7.2-7.7.4 at det kalde området langs gulvet rundt veggstolpen må være forårsaket av en kuldebro eller av infiltrasjon, siden temperaturen er minst 10 grader under temperaturen på gulvet og veggen rundt.

Grong kommune ble kontaktet for å prøve å spore opp noen som visste hvilke endringer som ble gjort i forhold til bygningstegningene, men på grunn av ombygging var det problematisk å komme til å arkivet.

Snekkerfirmaet som utførte byggingen av skolen var gått konkurs, og kommunens ansvarlige under byggingen av skolen var sluttet

Lave gulvtemperaturer nær veggstolpene er forventet å være den største negative effekten av infiltrasjon eller kuldebroer fra veggstolpene. Gulvet påvirker den termiske komforten mye, siden beina er i direkte kontakt med gulvet. Hvis man tillater 10 % misfornøyde, bør gulvtemperaturen være over 19 °C for mennesker med lett, innendørs fottøy i oppholdssonen, som vist i figur 7.8.3.(103) Dersom gulvet er kalt, kan brukeren av rommet kompensere ved å øke lufttemperaturen i rommet for å få den operative temperaturen opp på et behagelig nivå. Da øker varmetapet gjennom alle konstruksjonene.



Figur 7.8.3 Forventet andel misfornøyde som funksjon av gulvtemperaturen, for mennesker med lett, innendørs fottøy.(13)

Siden elevene ved skole bruker lett innendørs fottøy, viser grafen i figur 7.8.3 at den ideelle gulvtemperaturen er 22-24 °C. Oppholdssonen i rommet starter imidlertid 20 cm fra veggen, og ikke 60 cm som i definisjonen av oppholdssone, siden pultene er plassert nær ytterveggen.

Ved hjelp av et kontakttermometer ble gulvtemperaturen rundt en av veggstolpene målt. Målingene som er gjengitt i figur 7.8.4, viser at gulvtemperaturene på fremsiden av stolpen er rimelig upåvirket av kuldebroen langs siden av stolpen, mens gulvtemperaturen på siden av stolpen er litt lavere. Siden kalibreringen i figur 6.1 viser at kontakttermometeret viser 1-2 °C for høy temperatur når lufttemperaturen er 20 °C og kontakttermometeret måler 15-18 °C, kan temperaturene rundt stolpen ha vært enda lavere. Temperaturen 20-30 cm fra veggstolpen er rundt 19-20 °C, mens temperaturen en meter lenger ute på gulvet er 21 °C. Utetemperaturen var 4 °C da målingene ble utført. Ønsket om å holde en gulvtemperatur på minst 19 °C i oppholdssonen ser ut til å være tilfredsstilt denne dagen.

18,2	17,8	17,2		15,6	18	18,7		Ved vegg
19,5	19,2	18,3	19,7	17,9	19,3	19,6		0 cm
19,9	19,5	18,7	20	19	19,7	20		10 cm
20,2	19,9	19,5	20,4	19,6	20,1	20,2		20cm
20,4	20,2	20	20,7	20	20,5	20,5		30 cm
20,6	20,6	20,4	20,9	20,4	20,8	20,9		40 cm
20,8	20,7	20,6	21,1	20,7	21	21,1		50 cm
20,9	21,1	21	21,1	20,9	21,1			60 cm
21		21,1	21,2					70 cm
			21,2					80 cm
								90 cm
			21,2	21			cm	100 cm

Figur 7.8.4 Gulvtemperaturen rundt den sentrale veggstolpen i klasserom 123 målt med kontakttermometer. Målingene er tatt midt på stolpen og parallelt med siden av stolpen og deretter med 10 cm avstand mellom målepunktene til hver side. Bredden på stolpen er 14 cm. 17.03(4 °C)

I figur 7.8.5 er det beregnet hva temperaturene i figur 7.8.4 ville vært ved dimensjonerende utetemperaturen(-22,5 °C). Formlene for omregning står i kapittel V3 i vedlegget. Temperaturen på gulvet i de nærmeste 20 cm fra veggen ville stort sett vært under 15 °C, noe som vil føre til at omtrent 20 % av elevene som sitter inntil ytterveggen er misfornøyd fordi det er kaldt på gulvet ut fra figur 7.8.3. Likevel er det ikke 15 °C unormalt lav temperatur langs gulvet ut mot en yttervegg. Selv et godt isolert gulv etter dagens standard kan ha

temperaturer på 16-18 °C i de ytterste 30 cm mot ytterveggen.(102) Selv der det er tydelig kaldt nederst på veggstolpen, er gulvtemperaturen ikke merkbart redusert rundt veggstolpene(figur 7.7.2-7.7.4). Veggstolpene ser dermed ikke ut til å skape problemer for den termiske komforten, med mindre eventuell infiltrasjon skaper kald trekk på beina.

Resten av de dimensjonerende overflatetemperaturene lenger ute fra stolpen er stort sett under 18 °C, så over 10 % av elevene som sitter her vil være misfornøyde. Det er ikke mye med 10 % misfornøyde, siden figur 7.8.4 viser at man aldri vil få mindre enn 6 % misfornøyde. Gulvet har stor varmekapasitet. Det vil derfor ta tid å endre temperaturen i gulvet. For at gulvtemperaturene skal synke så lavt som i figur 7.8.5 må den gjennomsnittlige utetemperaturen trolig ha vært ned mot -22,5 °C over flere dager.

11,0	10,1	8,7	[redacted]	4,9	10,6	12,2	Ved vegg
14,1	13,4	11,3	14,6	10,3	13,6	14,3	Parallelt med
15,0	14,1	12,2	15,3	12,9	14,6	15,3	10 cm
15,8	15,0	14,1	16,2	14,3	15,5	15,8	20cm
16,2	15,8	15,3	16,9	15,3	16,5	16,5	30 cm
16,7	16,7	16,2	17,4	16,2	17,2	17,4	40 cm
17,2	16,9	16,7	17,9	16,9	17,6	17,9	50 cm
17,4	17,9	17,6	17,9	17,4	17,9		60 cm
17,6		17,9	18,1				70 cm
			18,1				80 cm
							90 cm
			18,1	17,6			100 cm
							cm

Figur 7.8.5 Dimensjonerende overflatetemperaturer rundt den sentrale veggstolpen i klasserom 123

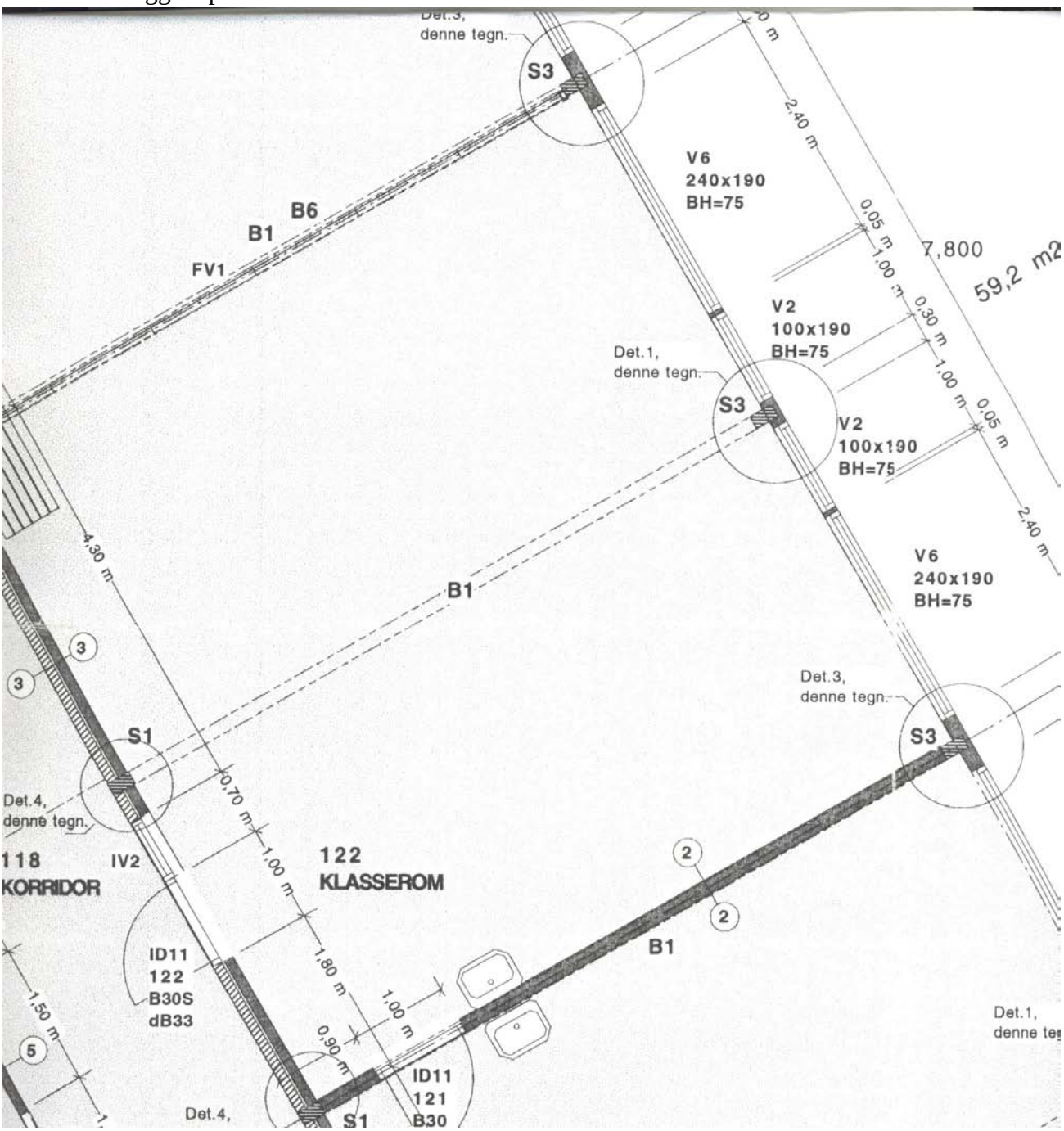
I tillegg ble temperaturen oppover langs sidene og midten av veggstolpen målt i målepunktene merket ”X” i figur 7.8.6. Målingene, som er gjengitt i tabell 7.8.1, viser at veggstolpen ikke er spesielt kald.

Figur 7.8.6 Målepunkter merket ”X” på siden og foran på den sentrale veggstolpen i klasserom 123. Avstanden mellom målepunktene vertikalt er 10 cm. Det er kaldt i målepunktene som er ringet rundt med rødt.17.03(4 °C).

Tabell 7.8.1 Temperaturer målt på veggstolpen i målepunktene merket X i figur 8.2.6.

17,5	20,3	21,7	21	20,2	20,4	19,8
15,8	19,8	21,4	21,3	19,8	19,9	19,6
11,1	18,5	21,1	21,1	19,3	18,7	14,2
17,2	18,3	18,3	19,7	17,9	16,9	15,6

Temperaturene virker normale, bortsett fra i målepunktene som er ringet rundt med rødt i figur 7.8.6. Det virker sannsynlig at det reduserte overflatetemperaturen her skyldes kuldebroen i figur 7.8.1. Kuldebroen er imidlertid ikke stor, og kjøler bare ned et svært lite område av veggstolpen.



Figur 7.8.7 Bygningstegning av klasserom 122 med veggstolper utringet og markert S3. (100) Klasserom 123, der målingene av gulvtemperatur ble tatt, ser likt ut bortsett fra at venstre sidevegg er yttervegg i klasserom 123.

7.9 Ringmuren

Tabell 7.9 Temperaturmålinger på yttervegg ved 1 °C utetemperatur

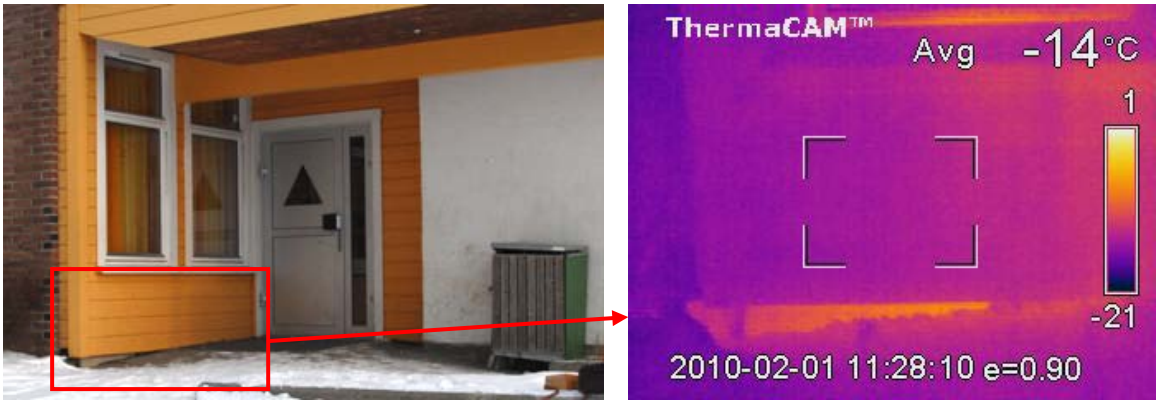
	Temperatur på ringmur	Temperatur på trevegg
Kontakttermometer	4 °C	3 °C
Termografi-kamera	0 °C (figur 7.9.4)	-2 °C (figur 7.9.3)

Temperaturen på ringmuren ble målt til å være 0 °C med termografi-kameraet(figur 7.9.4). Kalibreringen i kapittel 6 viste at termografi-kameraet i gjennomsnitt viser 1,4 °C for lav temperatur. Samtidig viser termografi-kameraet ytterligere 1 °C for lav temperatur ved målinger på betong med en innstilt emissivitet på 0,90, som diskutert i kapittel 1.1. Ringmuren har derfor en temperatur på 3-4 °C, så det er samsvar mellom målingene med termografi-kameraet og kontakttermometeret(tabell 7.9). Ettersom lufttemperaturen er nær veggtemperaturen, kan man anta ut fra kalibreringen i kapittel 6 at kontakttermometeret viser tilnærmet riktig temperatur.

Termografi-kameraets måling på treveggen i tabell 7.9 er usannsynlig, fordi veggtemperaturen ikke burde være under utetemperaturen når utetemperaturen har vært høyere tidligere på dagen. Selv om termografi-kameraet viser i gjennomsnitt 1,4 °C for lav temperatur, gir det en veggtemperatur på -0,5 °C. Så mest sannsynlig viser termografi-kameraet 3 °C feil, under antagelse om at kontakttermometeret viser riktig temperatur. Den antatt feilen stemmer bra med grafen i figur 6.2, som antyder at termografikameraets feil er økende ved lave temperaturer. Feilen ved 0 °C er ca. 3 °C i figur 6.2.

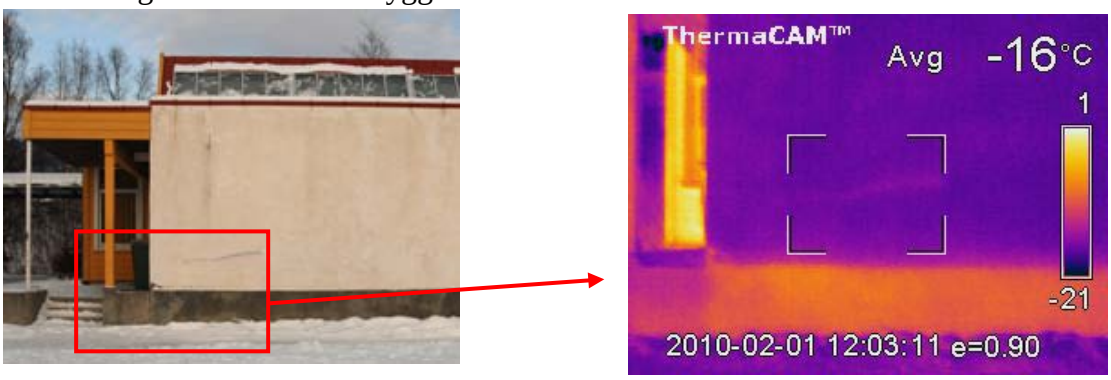
Siden temperaturforskjellen mellom veggen og ringmuren er så liten, kan forskjellen skyldes at kledningen er luftet. Dermed kan varmetapet være like stort gjennom veggen som gjennom ringmuren, men fordi kledningen kjøles ned av kald luft på innsiden ser den kaldere ut enn ringmuren på varmebildene. Samtidig viser figur 7.9.3 at det ikke ligger snø innerst mot ringmuren. Det kan skyldes varmeavgivelse fra ringmuren. Men det kan også skyldes takutstikket over vinduene.

Varmebildet i figur 7.9.1 ble tatt en annen dag da utetemperaturen var -12 °C. Ut fra varmebildet ser det ut til å være flere graders forskjell mellom temperaturen til ringmuren og veggtemperaturen. Veggtemperaturen er målt til -14 °C, mens ringmuren ser ut til å ha en temperatur på rundt -10 °C. Legg merke til at skalaen i figur 7.9.1-2 er bredere enn i varmebildene 7.9.3-7.9.5, slik at samme fargeforskjellen representerer forskjellig temperaturdifferanse.

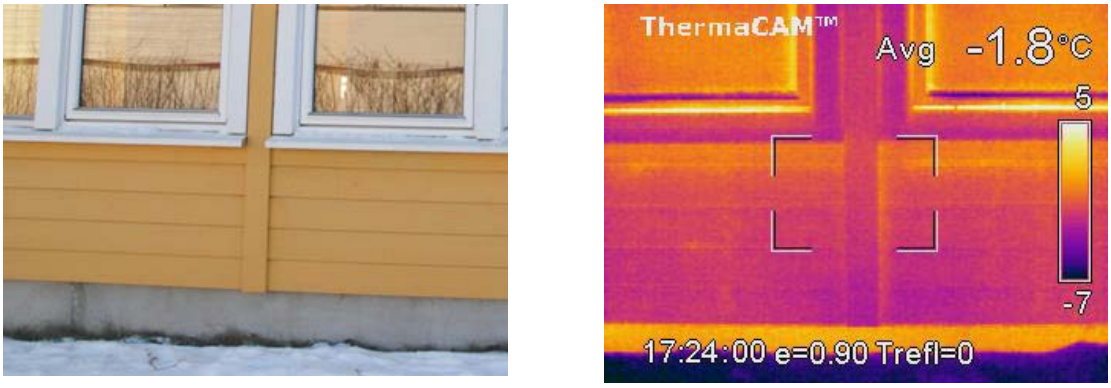


Figur 7.9.1 Ringmuren er varmere enn veggen. Manuell skala. (01.02, -12 °C) Ytterdøren YD140 vender mot vest og den gule veggen mot sør.

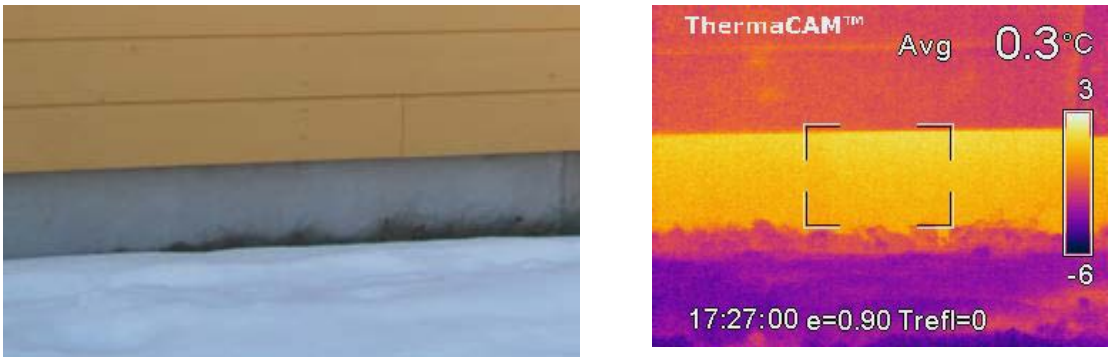
Varmebildet i figur 7.9.2 viser et lignende tilfelle der veggens temperatur er målt til -16 °C, mens ringmuren virker å være rundt -10 °C. Betongen i ringmuren virker å være en kuldebro, som leder gulvvarmen ut av bygget.



Figur 7.9.2 Utsiden av veggen på toalett 135 og ringmuren under. 01.02(-12 °C).



Figur 7.9.3 Ringmuren mot nordøst utenfor rom 123. Veggtemperaturen er i gjennomsnitt -1 °C viser fire målinger med termografikameraet. 17.03(1 °C)



Figur 7.9.4 Ringmuren mot nordøst utenfor rom 123. 17.03(1 °C)

Figur 7.9.5 Ringmuren mot nordøst utenfor rom 123 rett under stender. 17.03(1 °C)

8 Vurdering av effektbehovet for oppvarming av toalettene

Siden toalettene opplevdes som svært kalde, kan det stilles spørsmål ved om det ble dimensjonert en tilstrekkelig effekt til oppvarming av toalettene. En del av den tilførte effekten tapes til grunnen, siden gulvet i toalettene kun er isolert med 5 cm isolasjon i gulvet.(56) Wachenfeldts beregninger viser at energiforbruket i klasserommene med gulvvarme er omtrent 60 % høyere enn i de andre klasserommene.(104) I tillegg er store deler av rommets vegger yttervegger. Derfor vil det være konduksjonstap både til grunnen og ut gjennom veggen. Hjørnene er spesielt kalde. Det kan skyldes infiltrasjon på grunn av dårlig tetting mellom Leca-iso-blokkene, eller at isolasjonsevnen for veggen slik den er bygget opp er dårligere i hjørnene.

I følge Thorbjørn Landsem i Planconsult, som dimensjonerte varmeanlegget, er den installerte effekten til oppvarming av toalettet sannsynligvis 40-45 W/m^2.(105)

8.1 Varmetapet fra et gulv med gulvvarme

Varmetapet fra et gulv med gulvvarme blir høyere enn fra et gulv uten gulvvarme, siden gulvtemperaturen er høyere. Noe av varmen kan lagres under bygget, men det er begrenset ettersom de vanligste jordartene har relativt gode varmeledningsevner. I tillegg vil vannførende lag i grunnen også fjerne varme fra grunnen under bygget.(106)

Det anbefales at varmeisolasjonen under oppvarmede gulv på grunnen bør fordobles i forhold til tilsvarende uoppvarmede gulv.(106) For å gjøre et overslag over transmisjonstapet til grunnen, antas det at effekttapet er dobbelt så stort for et gulv med vannbåren varme nedlagt i gulvet, som for et tilsvarende uoppvarmet gulv, siden det anbefales å doble isolasjonstykkelsen. U-verdien til gulvet mot grunn antas derfor å være 0,30 W/m^{2}K , siden U-verdien til gulvet i klasserommet ble beregnet til 0,15 W/m^{2}K i ligning 7-29.

For å kontrollere hva maksimalt effektbehovet for oppvarming av toalett 137 er, utføres en beregning etter NS 3031:1987(107), ettersom effektberegninger er tatt ut av siste utgaven av NS3031.

8.2 Beregning av dimensjonerende effektbehov

Effektbehovet for å dekke totalt varmetap beregnes etter ligning 8-1:

$$\phi_n = \phi_t + \phi_i + \phi_v \qquad \text{(107)(ligning 8-1)}$$

ϕ_t er effektbehov (W) for å dekke varmegjennomgangstap

ϕ_i er effektbehov (W) for å dekke varmetap på grunn av infiltrasjon

ϕ_v er effektbehov (W) for å dekke varmetap på grunn av ventilasjon

U-verdiene for vegg og tak er hentet fra Wachenfeldts beregninger i tabell 5.2.2, siden beregningene inkluderer U-verdier med og uten kuldebroer. Siden U-verdiene som benyttes i beregningene er inkludert effekten av kuldebroer, sees siste leddet i ligning 8-2 bort fra.

$$\phi_t = \sum U \cdot A \cdot (\theta_{DI} - \theta_{DU}) + \sum \Delta U_l \cdot l \cdot (\theta_{DI} - \theta_{DU}) \quad (107)$$

(ligning 8-2)

U er varmegjennomgangskoeffisienten for hver bygningsdel (W/m^2K)

A er arealet for hver bygningsdel (m^2)

ΔU_l er tilleggsvarmetap per meter kuldebro ($W/m \cdot K$)

l er kuldebroens lengde (m)

θ_{DU} er dimensjonerende utetemperatur(-22,5 °C).

θ_{DI} er dimensjonerende innetemperatur og skal settes lik 20 °C for toaletter.(108)

$$\Delta\theta_{\text{dim}} = \theta_{\text{DI}} - \theta_{\text{DU}} = 20 - (-22,5) = 42,5 \text{ K}$$

$$\phi_{t,vegg} = 0,62 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot (5,5 + 3,9 \cdot 1,25)\text{m}^2 \cdot 42,5 \text{ K} = 273 \text{ W}$$

$$\phi_{t,tak} = 0,50 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 3,9\text{m}^2 \cdot 42,5 \text{ K} = 83 \text{ W}$$

$$\phi_{t,gulv} = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 3,9\text{m}^2 \cdot 42,5 \text{ K} = 50 \text{ W}$$

$$\phi_t = \phi_{t,vegg} + \phi_{t,tak} + \phi_{t,gulv} = 406 \text{ W}$$

Effektbehovet for å dekke infiltrasjonstapet gjennom bygningsdeler til det fri beregnes etter ligning 8-3:

$$\phi_i = C \cdot n_i \cdot V \cdot \Delta\theta_{\text{dim}} \quad (107)$$

(ligning 8-3)

C er luftens varmekapasitet og skal i følge NS3031 settes lik $0,35 \; Wh/m^3K$.(109)

n_i er antall luftvekslinger (h^{-1}) på grunn av infiltrasjon. Vindmålinger fra skolens EOS fra september 2002 viser at vinden stort sett ligger i intervallet 0-2 m/s.(110) Skolen ligger delvis skjermet i et innlandsstrøk. n_i settes derfor lik 0,15.(108)

V er rommets volum (m^3).

$\Delta\theta_{\text{dim}}$ er dimensjonerende temperaturforskjell mellom inne- og uteluften.

Effektbehovet for å dekke infiltrasjonstapet blir 18 W ut fra ligning 8-4.

$$\phi_i = 0,35 \; \text{Wh/m}^3\text{K} \cdot 0,15\text{h}^{-1} \cdot 8,19\text{m}^3 \cdot 42,5 \text{ K} = 18 \text{ W} \quad (107)$$

(ligning 8-4)

Effektbehovet for å dekke ventilasjonstapet sees bort fra, ettersom ventilasjonsluften tilføres ved overstrømning fra garderoben, der lufttemperaturen er den samme som på toalettet.

Totalt effektbehov for oppvarming av toalettet blir dermed 1401 W ut fra ligning 8-5.

$$\phi_n = \phi_t + \phi_i = 406 + 18 = 424 \text{ W} \qquad \text{(ligning 8-5)}$$

Nødvendig installert effekt pr kvadratmeter for å dekke oppvarmingsbehovet på toalettet på den kaldeste dagen blir dermed 109 W/m^2. Hadde toalettet vært uten kuldebroer, ville nødvendig installert effekt blitt 51 W/m^2. Den installerte effekten på 45 W/m^2 ville dermed vært tilstrekkelig dersom konstruksjonen hadde vært uten kuldebroer. På grunn av kuldebroene blir imidlertid installert effekt ikke tilstrekkelig til å dekke oppvarmingsbehovet på kalde dager.

9 Hva fører til elektrisk effektbruk utenfor driftstiden?

Tidligere undersøkelser har vist at det elektriske effektforbruket utenfor driftstiden er mellom 1,6-3,5 kW(kapittel 5.2.6). For å undersøke hvilket teknisk utstyr som trekker effekt, er data fra EOS-loggen studert. Målingene, som er gjengitt i tabell 10.1, ble gjort om natten på et tidspunkt da følgende vifter og pumper var avslått:

- avtrekksviften(111)
- tilluftsviften(111)
- viftene på toalettet(112)
- pumpen til varmegjenvinneren(113)
- pumpen til varmebatteriet for oppvarming av ventilasjonsluft*(113)

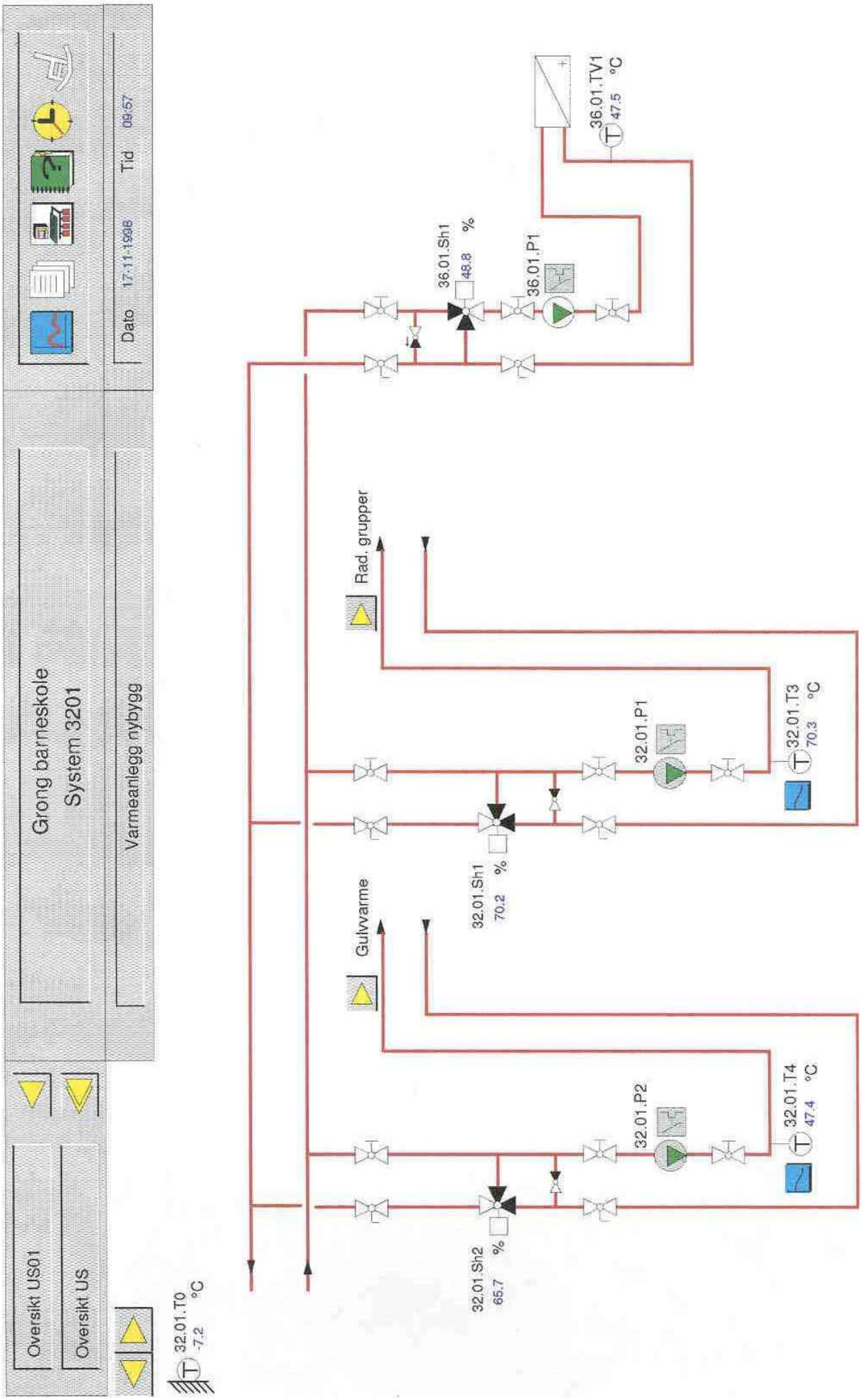
* avslått bortsett fra at den var på 5 minutter mellom kl 00:00 og 01:00 den 02.09.2002 og 03.09.2002.

Det eneste tekniske utstyret som kan antas å ha trukket vesentlig effekt som stod på mens målingene ble tatt var sirkulasjonspumpene for gulvvarmen og radiatorkretsen og EOS anlegget. Sirkulasjonspumpen for gulvvarmen er på hele tiden. Bortsett fra 03.09, da tilførselen av varmt vann er mellom 50-70 %, går pumpen med 0 % tilførsel av varmt vann og en vanntemperatur på ca 26 °C.(114) Sirkulasjonspumpen for radiatorkursene er på hele tiden. Bortsett fra 03.09, da tilførselen av varmt vann er mellom 50-70 %, går pumpen med 0 % tilførsel av varmt vann og en vanntemperatur på ca 49 °C.(115)

Tabell 10.1 Effektforbruket ved skolen utenfor driftstiden 4 dager ved midnatt(116)

Dato	Klokkeslett	Energimåler Elektrisitet[kWh]	Energimåler vannbåren varme[kWh]	Gjennomsnittlig elektrisk effektforbruk[kW]
30.08.2002	00:00:00	2702,0879	466	
30.08.2002	01:00:00	2703,7280	467	1,6401
31.08.2002	00:00:00	2811,1919	481	
31.08.2002	01:00:00	2812,8081	483	1,6162
01.09.2002	00:00:00	2846,6318	499	
01.09.2002	01:00:00	2848,2480	500	1,6162
02.09.2002	00:00:00	2883,9521	519	
02.09.2002	01:00:00	2885,5757	520	1,6236
03.09.2002	00:00:00	2992,5840	591	
03.09.2002	01:00:00	2994,1680	601	1,5840

Siden det vannbårne varmesystemet er regulert ved hjelp av shunt-ventiler, som vist i figur 10.1, er det mistanke om at det høye elektriske effektforbruket utenom driftstiden skyldes at sirkulasjonspumpene for gulvvarmen og radiatorkretsene går på maks effekt hele året. Til sammen har de et maksimalt effektforbruk på 1350 W(tabell 5.2.4). Resten av det elektriske effektforbruket utenfor driftstiden på ca. 250 W antas å skyldes EOS-systemet. Ved å slå av pumpene i perioder uten oppvarmingsbehov, kunne energibruken ved skolen vært redusert. Målingene i tabell 10.1 viser at energibruken til pumper er større enn energibruken til vannbåren varme enkelte tidspunkt. I løpet av en time den 30.08 forbrukes det for eksempel 1 kWh vannbåren varme, mens det er et elektrisk energiforbruk på 1,6 kWh(tabell 10.1). Samtidig skal det presiseres at energiforbruket til pumper ikke er helt unyttig, ettersom pumpene står i kjelleren og avgir varme til tilluften.

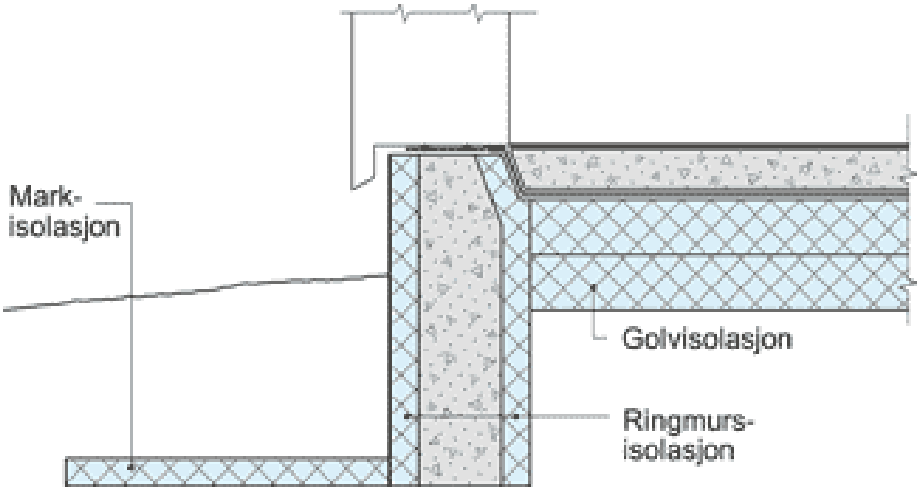


Figur 10.1 Oversikt over shunt-reguleringen av det vannbårne varmesystemet.

10 Hva burde vært gjort annerledes hvis et tilsvarende bygg skulle vært bygget i dag?

10.1 Utvendig isolering av ringmuren

For å hindre fuktskader og kuldebroeffekter bør så mye som mulig av varmeisolasjonen plasseres på utsiden eller inne i ringmuren. (117) Byggforsk anbefaler at ringmurer isoleres både innvendig og utvendig med 50mm ekspandert polystyren(EPS)(figur 11.1.1). Ringmuren på Grong barneskole har 50 mm isolasjon på innsiden av ringmuren, men det er ikke isolasjon på utsiden av ringmuren(figur 5.1.2). Kuldebrobryteren i anbefalingen er dobbelt så stor som dagens kuldebrobryter på 25mm. Det er også anbefalt en 50 mm tykk og 500 mm bred markisolasjon. I dag er markisolasjonen bare 100 mm bred. Isolering under jorden gjøres vanligvis med tunge plater av steinull eller plastisolasjon. Dersom det skal isoleres under fundamentene må det benyttes plastisolasjon som har trykkfasthet tilpasset vekten av konstruksjonen. (118)

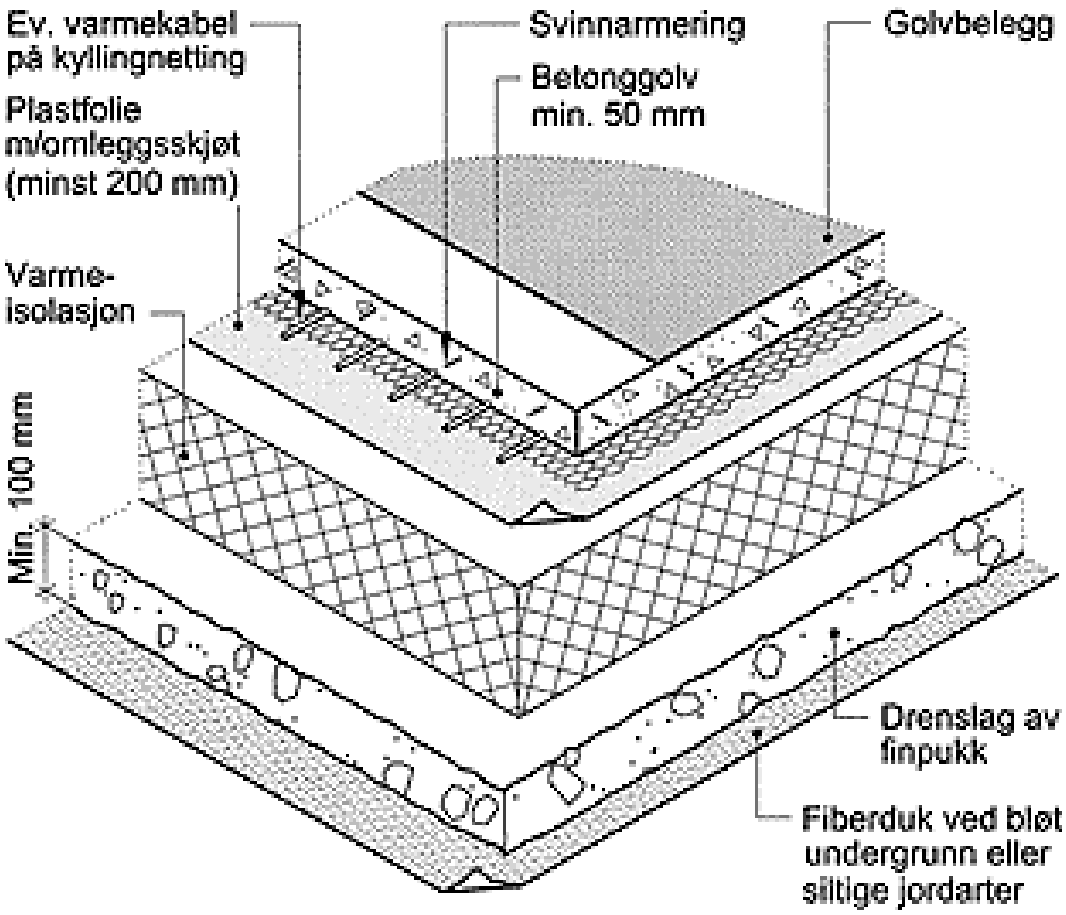


Figur 11.1.1 Eksempel på gulv mot grunnen med støpt ringmur. (102)

10.2 Mer isolasjon i gulv mot grunn

Kravet til U-verdien for gulv mot grunn har blitt halvert fra 0,30 til 0,15 W/m^{2}K fra 1987 til 2007. For å tilfredsstille dagens krav må man isolere med omtrent 250 mm EPS.(102) Det er 5 ganger så mye isolasjon som det er i gulvet mot grunn i dag. Det ville særlig lønt seg å isolere bedre mot grunnen i gulvene med nedlagt vannbåren varme i betonglaget og i gulvet i distribusjonskjelleren for ventilasjonsluft.

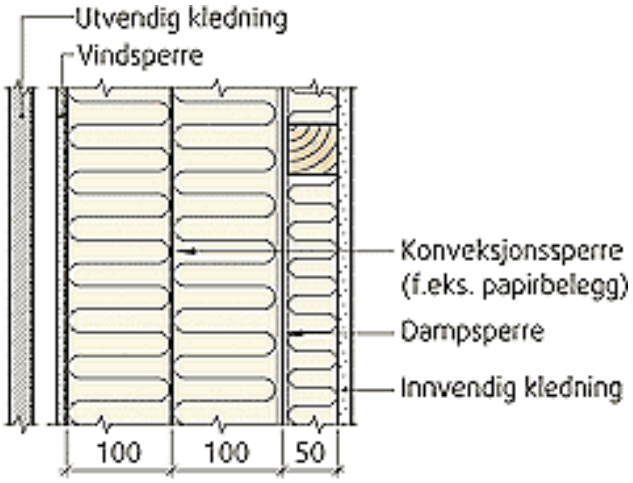
Selv om beregningen av U-verdien til gulv mot grunn i klasserommet i kapittel 7.7.1 gav en U-verdi på 0,15 W/m^{2}K, er det likevel en del usikkerhet i beregningen som gjør at det ville vært tryggest å legge inn litt ekstra isolasjon for å være på den sikre siden. Det er vanskelig å utbedre isolasjonen i gulv mot grunn etter at skolen er bygget, så da kan man godt legge seg litt under kravet i forskriftene for å ta høyde for at kravene i fremtiden kan bli enda strengere. Legger man seg under forskriftskravene kommer man heller ikke like dårlig ut dersom det skulle bli utilsiktede kuldebroer i gulvet som øker gulvets U-verdi. Et eksempel på anbefalt oppbygning av gulv mot grunn er vist i figur 11.2.1.



Figur 11.2.1 Oppbygning av betonggulv med underliggende varmeisolering.(119)

10.3 Mer isolasjon i yttervegger

Om man skal oppfylle kravet til energitiltak i TEK2007, skal U-verdien i yttervegger være maksimalt 0,22 W/m^2K. Ved en konduktivitet for steinull på 0,037 $W/m \cdot K$ tilsvarer det en isolasjonstykkelse på ca 250 mm. Dersom man i stedet velger å omfordele varmetapet og oppfylle rammekravet i TEK kan likevel ikke veggens U-verdi være dårligere enn 0,18 W/m^2K, som tilsvarer ca 200 mm isolasjon. Dagens isolasjonstykkelse er på 150 mm. Ved legging av isolasjonen er det viktig å unngå hulrom i toppen og bunnen av veggen. Slike hulrom uten isolasjon vil føre til luftsirkulasjon som øker varmetapet i tillegg til at det vil utgjøre en kuldebro. Isolasjonen må derfor måles nøye opp så den dekker hele veggen. For isolasjonstykkelser på over 200mm anbefales det at isolasjonen legges i to sjikt med forskjøvne skjøter for å unngå slike hulrom(figur 11.3.1). En annen fordel ved å dele opp isolasjonen i to lag er at luftsirkulasjonen i isolasjonen blir større for tykkere isolasjonslag. Luftsirkulasjonen øker det konvektive varmetapet gjennom isolasjonen. Ved å legge inn en luftsperre midt i isolasjonssjiktet reduseres varmegjennomgangen i veggen.(34)



Figur 11.3.1 Eksempel på oppbygning av yttervegg med konveksjonssperre. (34)

11 Hvordan kan bygningen oppgraderes for å redusere varmetapet?

Kravene til energieffektivitet i byggeforskriftene gjelder i utgangspunktet også for søknadspliktige rehabiliteringstiltak. Dette følger av Plan og bygningsloven § 87.(120) Det innebærer at dersom det utføres endringer på bygget som gjør at det etter kommunens skjønn blir vesentlig fornyet, skal denne delen av bygget oppfylle U-verdi-kravene i TEK 2007(tabell 5.2.3).

11.1 Redusere energiforbruket til teknisk utstyr

Ettersom skolen har god tilgang på dagslys og opprinnelig var planlagt med lysstyring, kunne det vært spart på energiforbruket til belysning hvis det hadde vært installert et lysstyringssystem som slo av den elektriske belysningen når dagslyset gav tilstrekkelig lys. I tillegg kunne sirkulasjonspumpene til gulvvarmen og radiatorene vært bedre regulert, slik at de slo seg av når det ikke var oppvarmingsbehov i bygget. På en annen side er det ikke sikkert det er så mange dager uten oppvarmingsbehov på toalettene, siden gulvet mot grunn er dårlig isolert. Samtidig er det ikke behov for å varme opp toalettene utenfor driftstiden. En måte å redusere energiforbruket ville vært å ha nattsenkning av temperaturen, slik at gulvvarmen var avslått i deler av ettermiddagen og natten. Men siden toalettene har vegger og gulv med stor varmekapasitet, kan det være vanskelig å få opp igjen temperaturen på toalettene dersom gulvvarmen slås av utenfor driftstiden. Siden den installerte effekten er knapp, vil det ta lang tid å heve temperaturen igjen. Da ville det ikke være mulig å senke temperaturen særlig mange timer, dersom den skulle vært oppe på akseptabelt nivå igjen ved skoledagens begynnelse. Selv om det kanskje ikke er mulig å redusere energiforbruket til pumper på hverdager, burde det være mulig å slå av pumpene i sommerferien. Dersom man aksepterte å ha kjøligere toaletter på varme deler av året, eller installert noen elektriske ovner og basert seg på elektrisk oppvarming når oppvarmingsbehovet var lite, kunne energibruken til pumpen for gulvvarme vært redusert.

11.2 Tetting av fuger på loftet

En fuge er et mellomrom i konstruksjonen. Der disse fugene fører til uønsket infiltrasjon, bør de tettes. Flatene som skal påføres fugematerialet bør være rene for at fugen skal feste. I tillegg bør porene i flatene tettes, slik at bindemidlene som får fugen til å feste til veggen ikke suges opp i underlaget. I kapittel 7.5 ser vi flere eksempler på infiltrasjon på loftet. Både undertrykket som avtrekksviften skaper og de mange hjørnene gjør at loftsveggene blir utsatt for infiltrasjon. I flere av hjørnene er det tydelige sprekker innvendig på veggen, som vist i figur 7.5.4 og 7.5.5 og 7.5.9. Det anbefales at det fuges der det er tydelige sprekker. I tilegg bør det fuges mellom taket og bjelkene siden bildene i kapittel 7.5 viser at det er tydelig infiltrasjon her.

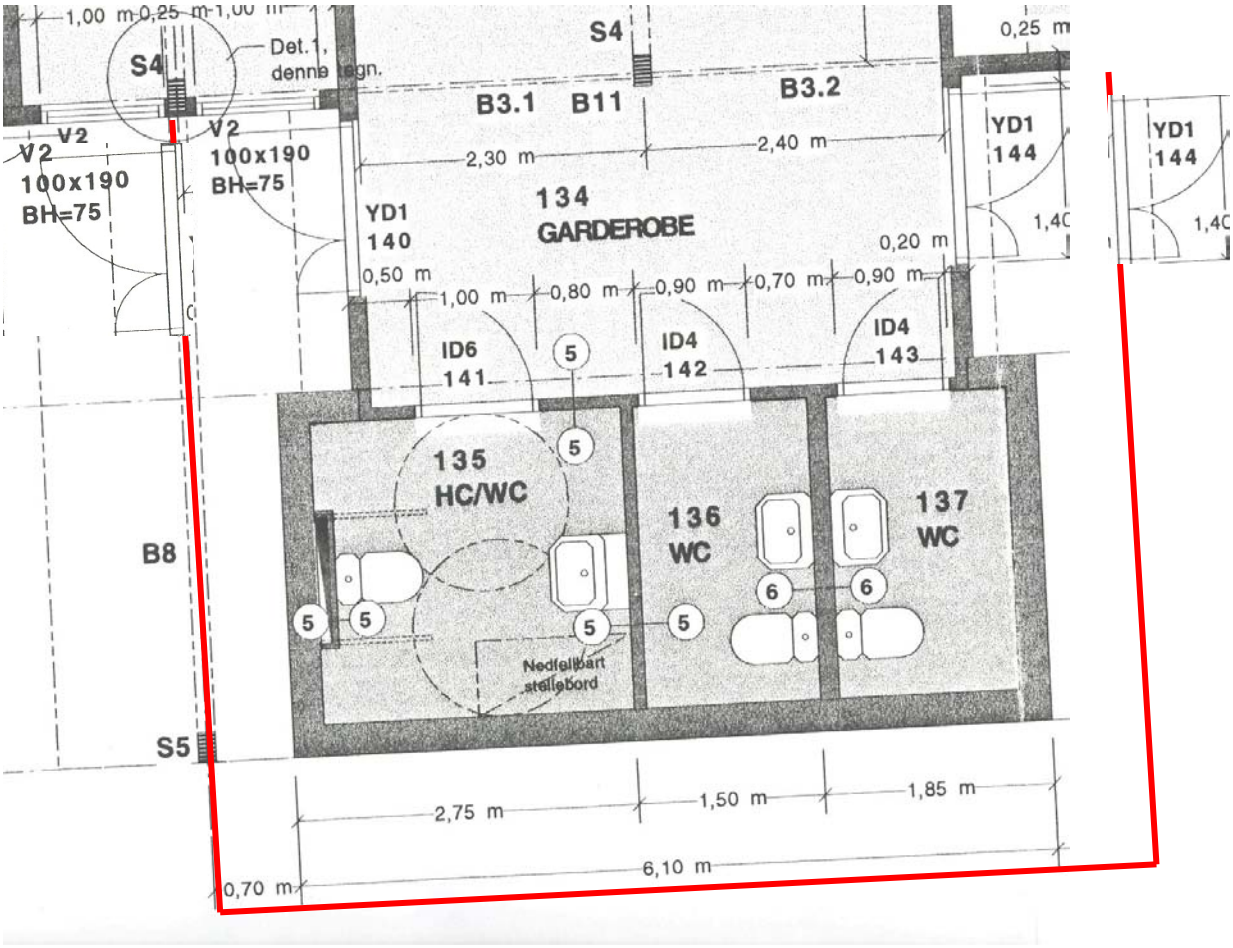
11.3 Sesongisolering av loftsvinduer

Dersom det er mulig å lage noen isolasjonsplater som kan festet til innsiden av vinduene på loftet i vinterhalvåret, vil det kunne redusere varmetapet fra avtrekksloftet i de delene av året der varmetapet er større enn varmetilskuddet fra solen. Det vil øke lufttemperaturen på loftet inn på varmegjenvinneren, slik at mer varme gjenvinnes fra avtrekksluften. For at det skal fungere må isolasjonsplatene være godt tilpasset vindusrutene, slik at det ikke blir luftsirkulasjon innenfor isolasjonen. For hvert av vinduene må isolasjonsplaten skjæres til slik at den akkurat dekker vindusglasset. Muligens kan isolasjonsplaten festes til en treplate.

Dersom det er mulig å lage en festeanordning på loftsveggen slik at isolasjonsplaten kan klemmes mot vindusruten fra innsiden av vinduet, unngår man luftsirkulasjon mellom isolasjonen og vinduet.

11.4 Bygge en svalgang rundt toalettet

Ved å bygge en ny vegg rundt toalettene, som vist i figur 12.4.1, slik at ytterdørene i garderoben bygges inn, kan varmetapet fra toalettene og ytterdørene reduseres, samtidig som den termiske komforten på toalettet forbedres. Svalgangen mellom den nye veggen og den gamle er tenkt å være uoppvarmet. Ved at temperaturen i den uoppvarmede svalgangen blir høyere enn utetemperaturen på grunn av varmetap fra toalettene, vil den nye veggen redusere varmetapet fra toalettene. I tillegg vil den lage et vindfang rundt toalettene, slik at luften står stille i svalgangen. Da vil infiltrasjonen gjennom toalettveggene og ytterdørene minimeres. Avtrekksluften fra de tre toalettene i hvert utbygg bør samles og føres opp i en egen kanal på avtrekksloftet, slik at varmen i ventilasjonsluften kan gjenvinnes.



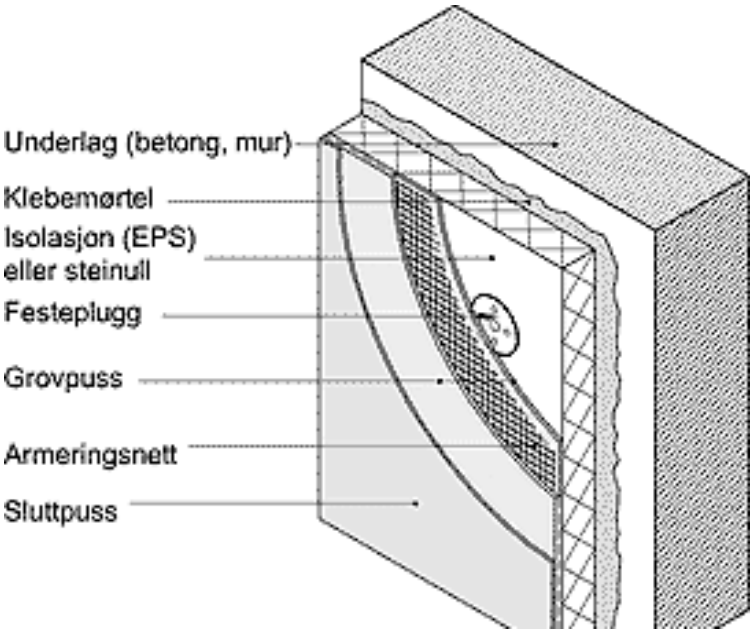
Figur 12.4.1 Skisse av hvordan en ny vegg(rød) kan bygges rundt toalettene og ytterdørene i garderoben. I veggen settes det inn nye ytterdører.

11.5 Etterisolere toalettveggene utvendig

En mindre kostbart alternativ er å kun etterisolere toalettveggene. Siden det er plass til å etterisolere utvendig, er utvendig etterisolering den enkleste måten å utbedre toalettveggen på. Den eneste ulempen med utvendig etterisolering er at overgangen mellom tak og vegg i mange tilfeller må bygges om som følge av at veggen flyttes utover. Ved innvendig etterisolering blir rommet mindre, samtidig som bruken av rommet blir hindret.(121)

Ved å bygge opp et nytt lag med isolasjon, en armert hovedpuss og en sluttpuss utenpå den gamle veggen kan man beholde veggens utseende, slik at man i størst mulig grad klarer å beholde bygningens arkitektur.

Med den gamle muren som underlag festes isolasjonsplatene midlertidig før de festes permanent med de mekaniske festepluggene. Grovpussen gir mekanisk styrke og beskytter mot inntrengning av fukt. Sluttpussen gir ønsket utseende, og danner en værhud(figur 12.5.1). (122)



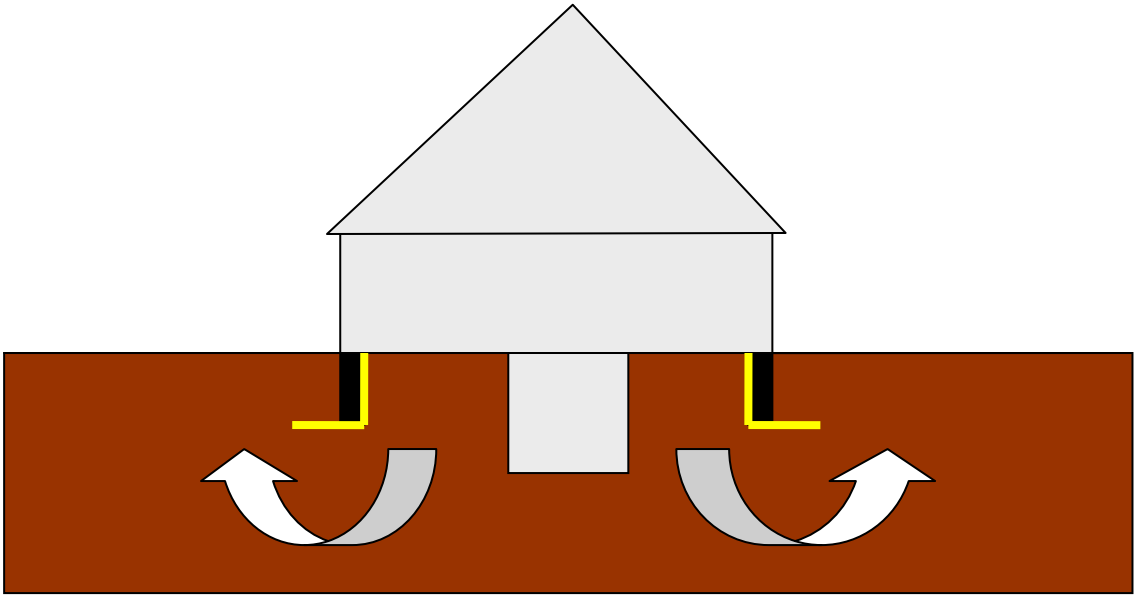
Figur 12.5.1 Skisse av etterisolering av murvegg (121)

11.6 Installere en ekstra varmeovn på hvert av toalettene

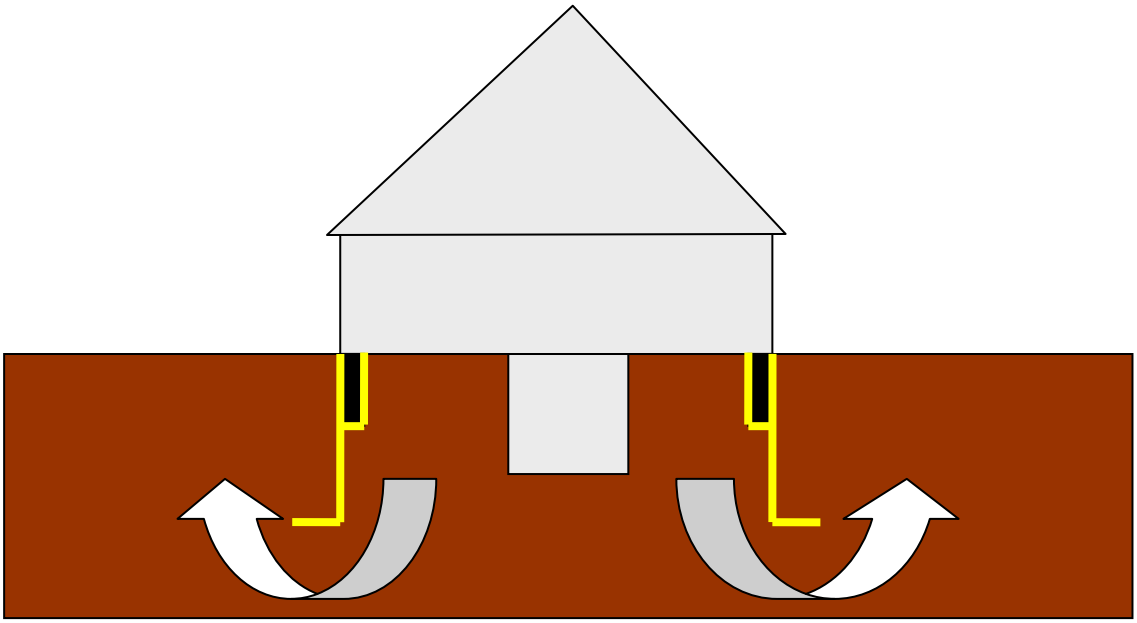
Den enkleste og billigste løsningen på kort sikt for å bedre den termiske komforten på toalettene er å installere en ekstra ovn på hvert av toalettene. Dersom det bygges en svalgang rundt toalettet, eller ytterveggene etterisoleres, vil effektbehovet for toalettene reduseres, slik at det ikke er behov for å installere en ekstra ovn. Siden gulvet er så dårlig isolert på toalettene, kunne det lønnet seg å installere en stråleovn på hvert toalett i tillegg til gulvvarmen. Stråleovner er gunstige fordi de øker den operative temperaturen, som er den opplevde temperaturen. Den operative temperaturen er gjennomsnittstemperaturen mellom lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen. Ved å rette stråleovnene mot oppholdssonen i toalettet kan varmen tilføres personen via stråling fra stråleovnen, uten at lufttemperaturen på toalettet behøver å økes. Dermed unngår man å øke varmetapet fra toalettet like mye som hvis man hadde økt lufttemperaturen.

11.7 Etterisolere ringmuren utvendig

Tidligere undersøkelser har vist at varmetapet til grunnen er i størrelsesordenen 80 kWh/m^{2}år. Det tilsvarer 40 % av det totale energiforbruket ved skolen. Siden varmetapet til grunnen utgjør en så stor del av det totale varmetapet, kan det være lønnsomt å gjøre tiltak for å redusere varmetapet til grunnen. Siden det er vanskelig å legge inn ekstra isolasjon i gulv mot grunn etter at bygget er bygget, kan et alternativ være å isolere ringmuren utvendig.. Det er mulig ved å grave opp utvendig langs ringmuren og feste plater av EPS-isolasjon til utsiden av ringmuren. I tillegg kan det være aktuelt å la isolasjonen fortsette lenger ned i bakken for å heve temperaturen i grunnen under skolen, slik av varmetapet til grunnen reduseres ved at temperaturdifferansen mellom gulvet inne og grunnen ute blir mindre(figur 12.7.2). Siden varmen stiger, vil den vertikale markisolasjonen bidra til å heve temperaturen under bygget. Jorden under bygget vil selv ha en varmemotstand som hindrer varmetap ved konduksjon nedover. Slik bygget er i dag, er det kun innvendig ringmurs-isolasjon(figur 12.7.1)



Figur 12.7.1 Skolen slik den er i dag med innvendig ringmurs-isolasjon. Isolasjonen er farget gul på tegningen og ringmuren er svart.



Figur 12.7.2 Skolen slik den kan bli med utvendig etterisolering av ringmur.

11.8 Etterisolere eller installere ekstra ovner i klasserommene

Det er ikke sikkert at effektbehovet til oppvarming av klasserommene blir tilstrekklig redusert ved etterisolering av ringmuren til at installert effekt for oppvarming er tilstrekkelig. I tillegg er det ikke sikkert det er økonomisk realiserbart å etterisolere ringmuren. Muligens blir investeringskostandene for høye og besparelsene for usikre. Derfor vurderes det alternative løsninger for å øke den termiske komforten på klasserommene. Det har vært et problem at klasserommene har vært opplevd som for kalde. Særlig gjelder det klasserommene i endene av fløyene som har to yttervegger.

Det vil trolig ikke være lønnsomt å etterisolere ytterveggene utvendig før fasadene krever utskiftning. Ved en fremtidig utskiftning av bordkledningen bør det vurderes å legge inn ekstra isolasjon i veggene. Endeveggen i hver av fløyene med klasserom, som er en trevegg forblendt med tegl, kan muligens etterisoleres. Selv om ytterveggene ikke fremstod som spesielt kalde under termograferingen har de et stort areal. U-verdien til murveggen er beregnet av Wachenfeldt til 0,50 W/m^2K, mens kravene i dagens forskrift er 0,18 W/m^2K(tabell 5.2.3). Varmetapet blir dermed stort. Dersom disse murveggene etterisoleres, vil trolig det eksisterende varmeanlegget være tilstrekkelig for å dekke maksimalt effektbehov til oppvarming av klasserommene.

Figur 11.8.1 Teglvegg på enden av bygget.

Problemet med å etterisolere murveggen innvendig vil være at rommet vil bli mindre. I tillegg kan det øke problemet med kuldebroer langs gulvet innenfor denne veggen fordi ytterveggen kjøles ned. Den opprinnelige veggen får også dårligere uttørkingsmuligheter på grunn av lavere veggtemperatur. Før det isoleres innvendig må teglsteinens frostbestandighet undersøkes.(121) Ulempen med utvendig etterisolering vil være at taket må bygges ut. I tillegg er det trolig dyrere å etterisolere utvendig, fordi en ny utvendig teglfasade koster mer enn en innvendig trevegg.

Ved å redusere varmetapet fra klasserommene unngår man å måtte skru opp tilluftstemperaturen på ventilasjonsluften for å få nok varmetilførsel til klasserommene på de kaldeste dagene. Som beskrevet i avsnitt 7.6 er det ikke lurt å øke tilluftstemperaturen på ventilasjonsluften, ettersom det reduserer effektiviteten av ventilasjonen og øker tilført luftmengde unødvendig mye.

En løsning å installere en ekstra radiator i klasserommene som oppleves å være for kalde. Utfordringen er at det kan bli vanskelig å finne plass langs veggene for en ekstra radiator ettersom det trolig ikke er plass til flere radiatorer under vinduene(figur 12.8.2), mens tilluftskassene dekker bakveggen(figur 12.8.3). Det er mulig det går an å montere en radiator under tavlen eller på den andre sideveggen(figur 12.8.4). Men ideelt sett hadde det vært mest lønnsomt å montere radiatoren på ytterveggen for å øke den gjennomsnittlige strålingstemperaturen fra denne siden, slik at det ikke føles kaldt for elevene som sitter nærmest de kalde vinduene og det kalde gulvet.

Figur 12.8.2 Radiatorer under vindu

Figur 12.8.3 Tilluftskasser på bakveggen

Figur 12.8.4 Finerplater på vegg under tavle

Alternativt kan det installeres noen ekstra elektriske ovner. Selv om det kan argumenters for at elektrisitet er høyverdig energi som ikke bør brukes til oppvarming, kan det vise seg å være det mest økonomiske alternativet frem til en eventuell etterisolering når fasadene skal skiftes ut.

11.9 Etterisolere gulvet i distribusjonskjelleren for ventilasjonsluft

Muligheten for å etterisolere gulvet mot grunn i ventilasjonskjelleren innvendig bør undersøkes. U-verdien for kjellergulvet er høy, siden kjellergulvet er uisolert. Det er uheldig, med tanke på at kjelleren er oppvarmet.

12 Konklusjon

I ”Undersøkelse av varmetap ved Grong barneskole” er fasadene termografert utvendig og innvendig for å avdekke kuldebroer og infiltrasjon. Termograferingen ble foretatt uten å trykksette bygget. På bakgrunn av de målte temperaturene er U-verdiene til de ulike bygningsdelene beregnet. U-verdiene er svært usikre, på grunn av stor usikkerhet i Rsi. Dersom metoden skal gi mer pålitelige resultater ved beregning av U-verdi bør Rsi for overflatene kartlegges nøyere. I tillegg bør temperaturene måles med flere instrumenter enn termografikameraet, når temperaturene skal brukes i beregninger av U-verdi.

Termograferingen tyder på at rammene i ytterdørene er betydelige kuldebroer. Trolig skyldes det konduksjon gjennom rammen til bakken og muligens infiltrasjon mellom rammen og ytterdøren. Konsekvensen av varmetapet fra ytterdørene blir forsterket ved at skolen har svært mange utgangsdører.

Beregninger viser at den installerte effekten for oppvarming av toalettene trolig ville vært tilstrekkelig dersom toalettene hadde vært uten kuldebroer og infiltrasjonen ikke hadde vært større enn normalt. På grunn av at varmetapet ble større enn beregnet, er det maksimale effektbehovet for oppvarming dobbelt så stort som installert effekt. En del av den tilførte effekten tapes til grunnen, på grunn av mangelfull isolering av gulv mot grunn. Når effektbehovet i tillegg økes på grunn av kuldebroer i hjørnene, blir toalettene ubehagelig kalde. U-verdien til toalettveggene ble anslått til å være 1,3 W/m^2K, mens kravene til yttervegger i TEK07 er 0,15 W/m^2K. Det anbefales at det bygges en svalgang rundt toalett-utbyggene for å redusere varmetapet fra ytterdørene i garderoben og toalettveggene.

På avtrekksloftet ble det oppdaget infiltrasjon flere steder. Ved oppføring av lignende bygninger må man være mer nøye mer utførelsen av vindtettingen på avtrekksloftet. I tillegg må man prøve å unngå å få like mange hjørner. I hjørner vil det alltid bli økt fare for infiltrasjon.

Kjellergulvets U-verdi er beregnet til å være 0,56 W/m^2K uten kuldebroer. Siden kjelleren er oppvarmet, burde gulvet vært bedre isolert. Kjellergulvets effekttap til grunnen er høyt. Mulighetene for å etterisolere kjellergulvet innvendig bør undersøkes. Gulvene mot grunn på resten av skolen er også dårlig isolert, men det er vanskelig å utbedre etter at bygget er bygget.

Klasserommene oppleves å være kalde deler av året. Særlig gjelder det klasserommene i enden av fløyene som har to yttervegger. Det foreslås at det gjøres en vurdering på muligheten for innvendig etterisolering av treveggene som er forblendt med tegl. Etterisolering bør vurderes opp mot muligheten for å installere ekstra radiatorer eller elektriske varmeovner.

Målinger av det elektriske effektforbruket tyder på at pumpene til gulvvarmen og radiatorene går på tilnærmet maksimal effekt hele året. Derfor anbefales det å undersøke hvordan pumpene til radiatorene og gulvvarmen kan reguleres bedre, slik at det ikke brukes energi til drift av pumper i perioder med lavt oppvarmingsbehov.

Referanser

1. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003.
2. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000.
3. SINTEF Byggforsk. Arealmåling av bygninger. Byggforskserien. 1991;Spesielle emner 321.005.
4. Standard Norge. NS 3031 Varmeisolering - Beregning av bygningers energi- og effektbehov til oppvarming og ventilasjon, utgave 4. 1987 page 5.
5. SINTEF Byggforsk. Fugetetting med elastisk fugemasse. Byggforskserien. 2003;Byggdetaljer 520.406.
6. Vojislav Novakovic et al., editor. Enøk i bygninger - Effektiv energibruk. 3 ed. Trondheim: Gyldendal Norsk Forlag AS; 2007 page 221.
7. Vojislav Novakovic et al., editor. Enøk i bygninger - Effektiv energibruk. 3 ed. Trondheim: Gyldendal Norsk Forlag AS; 2007 page 12.
8. Swegon. Ventilasjonsprinsipper. 2007 [18.05.2010]; Available from: http://web1.swegon.com/swegon/templates/ClusterPage____42843.aspx.
9. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 37.
10. Byggforskserien. Kuldebroer - Konsekvenser og dokumentasjon av energibehov. Byggforskblad 471015. 2008.
11. Standard Norge. NS 3700 Kriterier for passivhus og lavenergihus - Boligbygninger. Lysaker2010.
12. Standard Norge. NS 3031:2007 Beregninger av bygningers energiytelse. 2007.
13. SINTEF Byggforsk. Temperaturforhold og lufthastighet. Betingelser for termisk komfort. Byggforskserien. 1999;Byggdetaljer 421.501.
14. Vojislav Novakovic et al., editor. Enøk i bygninger - Effektiv energibruk. 3 ed. Trondheim: Gyldendal Norsk Forlag AS; 2007 page 133.
15. Arkitektur og byggteknikk SINTEF Byggforsk. Hva er et passivhus? Trondheim; Available from: http://www.passiv.no/hva_er_et_passivhus.
16. NS-EN13187. Bygningers termiske egenskaper
Kvalitativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjermer
Infrarød metode. 1998.
17. Standard Norge. NS-EN13187 Bygningers termiske egenskaper
Kvalitativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjermer
Infrarød metode. 1998 page 6.
18. Vojislav Novakovic et al., editor. Enøk i bygninger - Effektiv energibruk. 3 ed. Trondheim: Gyldendal Norsk Forlag AS; 2007 page 222.
19. Vojislav Novakovic et al., editor. Enøk i bygninger - Effektiv energibruk. 3 ed. Trondheim: Gyldendal Norsk Forlag AS; 2007 page 157.
20. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 16.
21. Daniel Türler Brent T. Griffith, and Dariush Arasteh. Surface Temperatures of Insulated Glazing Units: Infrared Thermography Laboratory Measurements. ASHRAE Transactions 1996, V 102 PT 2. 1995.
22. Standard Norge. NS-EN13187 Bygningers termiske egenskaper
Kvalitativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjermer
Infrarød metode. 1998.

23. Standard Norge. NS-EN13187 Bygningers termiske egenskaper
Kvalitativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjermer
Infrarød metode. 1998 page 7.
24. Standard Norge. NS-EN13187 Bygningers termiske egenskaper
Kvalitativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjermer
Infrarød metode. 1998 page 39.
25. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 65.
26. Standard Norge. NS-EN13187 Bygningers termiske egenskaper
Kvalitativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjermer
Infrarød metode. 1998 page 9.
27. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 40.
28. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 41.
29. SINTEF Byggforsk. Utbedring av kuldebroer. Byggforskserien. 1999;Byggforvaltning 720.015.
30. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 303.
31. Superinsulated office buildings with glass facades. In: The Danish Building and Urban Research, editor. By og Byg Results2003.
32. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 24.
33. SINTEF Byggforsk. Kuldebroer - Konsekvenser og dokumentasjon av energibehov. Byggforskserien. 2008 page 4;Byggdetaljer 471.015.
34. SINTEF Byggforsk. Yttervegger over terreng. Egenskaper og konstruksjonsprinsipper. Krav og anbefalinger. Byggforskserien. 2008;Byggdetaljer 523.002.
35. TEK. Forskrift om krav til byggverk - TEK. 2007 [cited 2010 20.02]; Available from: http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-19970122-0033.html.
36. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 32.
37. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 34.
38. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 35.
39. SINTEF Byggforsk. Bindingsverk av tre. Varmeisolering og tetting. Byggforskserien. 2007;Byggdetaljer 523.255.
40. SINTEF Byggforsk. Materialer til luft- og damptetting. Byggforskserien. 2003;Byggdetaljer 573.121.
41. Jan Vincent Thue Stig Geving. Fukt i bygninger. 2002 page 344.
42. Standard Norge. NS-EN ISO 6946 Bygningskomponenter og -elementer. Varmemotstand og varmegjennomgang. Beregningsmetode. 2007 page 4.
43. Vojislav Novakovic et al., editor. Enøk i bygninger - Effektiv energibruk. 3 ed. Trondheim: Gyldendal Norsk Forlag AS; 2007 page 377.
44. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000 page 37.
45. Per Olaf Tjelflaat. Personlig meddelelse 17.03.2010. 2010.
46. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000 page 7.

47. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000 page 10.
48. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 187.
49. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 205.
50. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000 page 15.
51. Kåre Herstad. Ny barneskole snitt, skolefløyer. In: 95002-143, editor. Verdal: Letnes Arkitektkontor; 11.10.1997.
52. Letnes Aktitektkontor, editor. Grong barneskole Bok 2.2 Bygningsmessige arbeider. Verdal,1997 page 222.8.
53. Letnes Aktitektkontor, editor. Grong barneskole Bok 2.2 Bygningsmessige arbeider. Verdal,1997 page 222.12.
54. Letnes Aktitektkontor, editor. Grong barneskole Bok 2.2 Bygningsmessige arbeider. Verdal,1997 page 222.13.
55. Letnes Aktitektkontor, editor. Grong barneskole Bok 2.2 Bygningsmessige arbeider. Verdal,1997 page 222.14.
56. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 144.
57. Letnes Aktitektkontor, editor. Grong barneskole Bok 2.2 Bygningsmessige arbeider. Verdal,1997 page 224.3.
58. Kåre Herstad. Personlig meddelselse på telefon 12.03.2010. 2010.
59. Leca. Leca isoblokk 30 cm. Leca 7400,2003 page 4.
60. Leca. Leca isoblokk 30 cm. Leca 7400,2003 page 3.
61. Letnes Aktitektkontor, editor. Grong barneskole Bok 2.2 Bygningsmessige arbeider. Verdal,1997 page 222.60.
62. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 68.
63. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 7.
64. Norwegian University of Science and Technology Profesor Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000.
65. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 283.
66. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 298.
67. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 307.
68. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 330.

69. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 220.
70. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 309.
71. SINTEF Byggforsk. Varmegjenvinnere i ventilasjonsanlegg. Byggforskserien. 2002;Ventilasjonsanlegg 552.340.
72. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 331.
73. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 309-310.
74. Jens Thomassen. Personlig meddelelse over telefon fra vaktmester 18.06.2010. 2010.
75. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 282-283.
76. FOR 1997-01-22 nr 33: Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK). In: Miljøverndepartementet Kommunal- og regionaldepartementet, editor. Oslo,2007.
77. Statens Bygningstekniske Etat. Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk - Tekniske forskrifter til plan- og bygningsloven av 14. juni 1985 nr. 77. Oslo1997 [20.05.2010]; Available from: http://www.be.no/beweb/regler/forskrift/tekn97/08helse.html.
78. Kommunal- og arbeidsdepartementet og Miljøverndepartementet. Byggeforskrift 1987. 1987; Available from: http://oppslagsverket.dsb.no/content/arkiv/plan-bygg/byggeforskrift-1987/.pdf?expand-content=on.
79. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 182.
80. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000 page 16.
81. Letnes Aktitektkontor, editor. Grong barneskole Bok 2.2 Bygningsmessige arbeider. Verdal,1997 page 3.
82. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 280-281.
83. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000 page 39.
84. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 256.
85. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 279.
86. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000 page 5.
87. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000 page 6.
88. Standard Norge. NS-EN-ISO 13370 Bygningers termiske egenskaper - Varmeoverføring via grunnen - Beregningsmetoder. 2007.

89. Vojislav Novakovic et al., editor. Enøk i bygninger - Effektiv energibruk. 3 ed. Trondheim: Gyldendal Norsk Forlag AS; 2007 page 163.
90. Standard Norge. NS-EN-ISO 13370 Bygningers termiske egenskaper - Varmeoverføring via grunnen - Beregningsmetoder. 2007 page 3.
91. Standard Norge. NS-EN-ISO 13370 Bygningers termiske egenskaper - Varmeoverføring via grunnen - Beregningsmetoder. 2007 page 7.
92. Standard Norge. NS-EN-ISO 13370 Bygningers termiske egenskaper - Varmeoverføring via grunnen - Beregningsmetoder. 2007 page 4.
93. Standard Norge. NS-EN13187 Bygningers termiske egenskaper Kvalitativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjermer Infrarød metode. 1998 page 4.
94. Standard Norge. NS-EN-ISO 13370 Bygningers termiske egenskaper - Varmeoverføring via grunnen - Beregningsmetoder. 2007 page 12.
95. Standard Norge. NS-EN-ISO 13370 Bygningers termiske egenskaper - Varmeoverføring via grunnen - Beregningsmetoder. 2007 page 13.
96. SINTEF Byggforsk. Beregning av U-verdi og varmestrøm for konstruksjoner mot grunnen etter NS-EN ISO 13370. Byggforskserien. 1999;Byggdetaljer 471.009.
97. Per Olaf Tjelflaat. Pilot study report: Mediå School Grong, Norway. IEA-ECB&CS Annex 35. 2000 page 22.
98. Standard Norge. ISO 10456 Byggematerialer og -produkter. Hygrotermiske egenskaper. Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarerte og praktiske termiske verdier. 2007 page 9.
99. Standard Norge. ISO 10456 Byggematerialer og -produkter. Hygrotermiske egenskaper. Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarerte og praktiske termiske verdier. 2007 page 10.
100. Kåre Herstad. Utsnitt ny barneskole plan h.etg; småskoletrinn. In: 95002-141A, editor. Verdal: Letnes Arkitektkontor; 13.10.1997.
101. Standard Norge. NS-EN-ISO 13370 Bygningers termiske egenskaper - Varmeoverføring via grunnen - Beregningsmetoder. 2007 page 9.
102. SINTEF Byggforsk. Golv på grunnen med ringmur. Varmeisolering, frostsikring og beregning av varmetap. Byggforskserien. 2005;Byggdetaljer 521.112.
103. SINTEF Byggforsk. Kuldebroer - Konsekvenser og dokumentasjon av energibehov. Byggforskserien. 2008 page 5;Byggdetaljer 471.015.
104. Bjørn Jenssen Wachenfeldt, editor. Natural ventilation in buildings - detailed prediction of energy performance. Trondheim: NTNU - Norwegian University of Science and Technology; 2003 page 328.
105. Thorbjørn Landsem. Personlig meddelelse 27.04.2010. 2010.
106. SINTEF Byggforsk. Vannbåret golvvarme. Byggforskserien. 1991;Oppvarming og temperaturregulering 552.111.
107. Standard Norge. NS 3031 Varmeisolering - Beregning av bygningers energi- og effektbehov til oppvarming og ventilasjon, utgave 4. 1987 page 5-6.
108. Standard Norge. NS 3031 Varmeisolering - Beregning av bygningers energi- og effektbehov til oppvarming og ventilasjon, utgave 4. 1987 page 14.
109. Standard Norge. NS 3031 Varmeisolering - Beregning av bygningers energi- og effektbehov til oppvarming og ventilasjon, utgave 4. 1987 page 6.
110. EOS-systemet på Grong barneskole. VÆRDATA.txt i mappen GrongData3Sep02, fått fra Per Olaf Tjelflaat2002.
111. EOS-systemet på Grong barneskole. VIFTER.txt i mappen GrongData3Sep02, fått fra Per Olaf Tjelflaat2002.

112. EOS-systemet på Grong barneskole. AVTR_V3.txt i mappen GrongData3Sep02, fått fra Per Olaf Tjelflaat2002.
113. EOS-systemet på Grong barneskole. PUMP3601.txt i mappen GrongData3Sep02, fått fra Per Olaf Tjelflaat2002.
114. EOS-systemet på Grong barneskole. GULVKURS.txt i mappen GrongData3Sep02, fått fra Per Olaf Tjelflaat2002.
115. EOS-systemet på Grong barneskole. RADKURS.txt i mappen GrongData3Sep02, fått fra Per Olaf Tjelflaat2002.
116. EOS-systemet på Grong barneskole. EFFEKT.txt i mappen GrongData3Sep02, fått fra Per Olaf Tjelflaat2002.
117. SINTEF Byggforsk. Valg av fundamentering og konstruksjoner mot grunnen. Byggforskserien. 2005;Byggdetaljer 521.011.
118. SINTEF Byggforsk. Yttervegger mot terreng. Varmeisolering og tetting. Byggforskserien. 2007;Byggdetaljer 523.111
119. SINTEF Byggforsk. Betonggolv på grunnen. Byggforskserien. 2003;Byggdetaljer 522.111.
120. Statens Bygningstekniske Etat. Ren veiledning til teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven. 2007 page 81(4).
121. SINTEF Byggforsk. Etterisolering av betong- og murvegger. Byggforskserien. 2003;Byggdetaljer 723.312.
122. SINTEF Byggforsk. Fasadesystemer med puss på isolasjon. Byggforskserien. 2005;Byggdetaljer 542.303.
123. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 18.
124. Per Kristian Karlsen, editor. Tetthetsmålinger og termografi av bygninger. Oslo: Informasjonsselskapet Verdi AS; 2007 page 21.
125. Karl H.Grimnes. ThermaCAM E2 Brukermanual. Oslo: Presisjons Teknikk AS; 2002.
126. Standard Norge. NS 3031 Varmeisolering - Beregning av bygningers energi- og effektbehov til oppvarming og ventilasjon, utgave 4. 1987 page 22.

Vedlegg

V1 Termografi som metode

Hvordan beregner termografi-kameraet overflatetemperaturen?

Alle objekter med temperatur over det absolutte nullpunkt sender ut elektromagnetisk stråling. Et termografi-kamera(varmesøkende kamera, IR-kamera) har sensorer som registrerer den infrarøde(IR) strålingen som sendes ut fra overflatene som fotograferes. Termografi-kameraet benytter Stephan-Boltzmann's lov til å regne ut overflatetemperaturen ved at det måler strålingsfluxen og regner ut temperaturen ut fra den innstilte emissiviteten(ε). En feil i emissiviteten får imidlertid ikke store utslag i den avleste temperaturen, siden man bruker fjerderoten av ε i beregningene av overflatetemperaturen(ligning A).

$$T_s = \sqrt[4]{Q_{\text{emittert}} / \varepsilon\sigma} \qquad \text{(ligning A)}$$

$Q_{emittert}$ er emittert strålingsflux i W/m^2

σ er Stephan Bolzmann constant = $5{,}67 \cdot 10^{-8} \mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{K}^{-4}$

ε er emissiviteten til flaten som sender ut stråling

T_s er overflatetemperaturen i K

Hva beskriver emissiviteten?

Emissiviteten er definert som forholdet mellom utstrålingen fra overflaten i forhold utstrålingen fra et svart legeme ved samme temperatur, slik at et ideelt svart legeme har $\varepsilon = 1$. Et svart legeme er et teoretisk begrep som brukes om et material som absorberer all stråling. (9) Siden all stråling som kommer inn mot et legeme enten må reflekteres, transmitteres eller absorberes, betyr det at et svart legeme ikke reflekterer eller transmitterer noe stråling. Det er en fordel av overflaten ikke reflekterer stråling fra omgivelsene. Reflektert stråling kan føre til feil i kameraets temperaturberegning, dersom kameraet ikke klarer å skille den emitterte strålingen fra den reflekterte. Ved å angi omgivelsestemperaturen på kameraet filtreres reflektert stråling ved omgivelsestemperaturen bort. Når overflatetemperaturen skal bestemmes nøyaktig er det derfor vanlig å sette svart tape på overflaten. Svart tape har en kjent emissivitet på 0,97.

Refleksjon

Når uventede temperaturforskjeller oppstår, slik at det er mistanke om refleksjon, bør målet termograferes fra en annen posisjon. Ved refleksjon fra en kilde som har høyere strålingstemperatur enn målet som termograferes, vil de varme flekkene bli borte eller flytte seg når målet termograferes fra en annen vinkel.(20) Eksempler på refleksjonskilder kan være varmeovner, belysning, solen og termograføren.

Avstand til overflaten

På grunn av at oppløsningen til kameraet er begrenset, lønner deg seg å termografere overflaten fra kort avstand. For objektivet som fulgte med kameraet må man stå omtrent dobbelt så langt unna som bredden på overflaten man skal termografere, siden bildevinkelen til kameraet er begrenset til 30 grader. Etter hvert som avstanden fra overflaten øker til rundt 30 meter, vil feilen bli så stor at den bør tas hensyn til.(123)

Valg av palett

Termografi-kameraet har tre ulike paletter jernpalett, regnbuepalett og gråtonepalett. Jernpaletten er den mest vanlig brukte ved byggtermografi i Norge.(124) Den viser de kaldeste flatene i varmebildene som mørk turkis og de varmeste flatene som gulhvite. Regnbuepaletten har mange flere farger i skalaen og gir derfor flere detaljer. Det kan imidlertid gå på bekostning av oversikten. Derfor velges jernpaletten.

Fordeler og ulemper med manuell skala

Ulempen ved å bruke en manuell skala mellom 18-22 °C i eksempelet i figur 1 i innledningen ville vært at det ikke lenger var mulig å si hvilken temperatur hvitt eller svart i bildet tilsvarte. Hvitt ville bare indikert at temperaturen var over 22 °C, men ikke sagt om den var 22 °C eller 30 °C. Fordelen med manuelt innstilt skala ville vært at det hadde blitt større kontraster, slik at det hadde blitt lettere å skille ulike temperaturer i bildet fra hverandre. Hadde det for eksempel vært en varmeovn med overflatetemperatur på 40 °C i bildet i figur 1, kunne det lønt seg å stille skalaen manuelt dersom man ønsket å fokusere på infiltrasjonen, for ellers hadde skalaen gått fra 40-15 °C og det hadde blitt vanskelig å lese av nøyaktig hvilken temperatur en farge tilsvarte. En annen fordel med en fast manuell skala er at man lettere kan sammenligne ulike bilder med hverandre fordi fargene da representerer samme temperatur.

V2 Termografikameraet ThermaCAM™ E2

Utstyrets begrensninger

Siden det ikke var tilgjengelig programvare for termografi-kameraet som gjorde det mulig å endre temperaturskalaen etter at bildet var tatt, var det vanskelig å lese av nøyaktige temperaturer fra bildene. I tillegg hadde det vært ønskelig å hatt en lufthastighetsmåler som kunne kontrollert om de kalde feltene i varmebildene skyldes kuldebroer eller infiltrasjon. Vanligvis brukes et apparat som beregner lufthastigheten ut fra hvor fort en oppvarmet metalltråd kjøles ned av luftstrømmen.

Mer avansert programvare ville gjort det mulig å legge inn en linje i termogrammet og få opp en kurve som viser den nøyaktige temperaturen langs linjen. Når kameraet står på automatisk innstilling av temperaturskalaen, kan den høyeste temperaturen i bildet være i et punkt, for eksempel en spiker, som ikke er synlig i varmebildet.. Da kan man feilaktig anta at den lyseste fargen i bildet tilsvarer den høyeste temperaturen i bildet.

Termografi-kameraets tekniske data

Modell:	ThermaCAM™ E2, serienummer 21501406
Bildevinkel:	25°
Nærgrense:	0,3 meter
Detektor type	Focal Plane Array (FPA), ukjølt mikrobolometer
Oppløsning	160 x 120 pixels
Sensorenes følsomhetsområde:	7,5 – 13 μm
Temperaturområde (125)	-20 til +250°C med nøyaktighet ±2°C og følsomhet 0,7K

Kalibrering av termografi-kameraets temperaturmåling

Tabell 1 Sammenligning av ulike temperaturmålere

Kvikksølv-termometer	**Kontakt-termometer**	**Average-temperatur termokamera**	**Avvik for kontakttermometer i forhold til kvikksølv-termometer**	**Avvik for termokamera i forhold til kvikksølv-termometer**
0,2 °C	5,2 °C	-1,6 °C	5,0	-1,8
8,5 °C	12,5 °C	7,9 °C	4,0	-0,6
10,7 °C	13,7 °C	10,3 °C	3,0	-0,4
21,7 °C	21,8 °C	21,0 °C	0,1	-0,7

V3 Korreksjon av målt temperatur til dimensjonerende verdi

For å finne overflatetemperaturene på gulvet blir ved dimensjonerende utetemperatur, $\theta_{\text{si dim}}$, korrigeres de målte overflatetemperaturene mot dimensjonerende utetemperatur. $\theta_{\text{si dim}}$ er gitt av ligning B. Innendørs lufttemperatur ble ikke målt, men antas å være 22 °C ut fra de målte overflatetemperaturene.

$$\theta_{\text{si dim}} = \theta_{\text{DI}} - \Delta\theta_{\text{inne dim}} \qquad (29) \qquad \text{(ligning B)}$$

θ_{DI} er dimensjonerende innetemperatur, som settes lik settpunktet på 20 °C.

$\Delta\theta_{\text{inne dim}}$, gitt av ligning C, er dimensjonerende temperaturforskjell mellom inneluften og gulvet.

$$\Delta\theta_{\text{inne dim}} = \frac{\Delta\theta_{\text{inne}} \cdot \Delta\theta_{\text{dim}}}{\Delta T} \qquad (29) \qquad \text{(ligning C)}$$

$\Delta\theta_{\text{dim}}$, gitt av ligning D, er dimensjonerende temperaturdifferanse mellom inne- og uteluften.

$$\Delta\theta_{\text{dim}} = \theta_{\text{DI}} - \theta_{\text{DU}} \qquad \text{(ligning D)}$$

θ_{DU} er stedets laveste gjennomsnittstemperatur over 3 døgn i løpet av en 30-års periode.

For Grong er θ_{DU} = -22,5 °C.(126).

$\Delta\theta_{\text{inne}}$ er målt differanse mellom innendørs lufttemperatur og gulvets overflatetempearatur.

$\Delta\theta_{\text{inne}}$ er gitt av ligning E.

$$\Delta\theta_{\text{inne}} = T_{\text{inne}} - T_{\text{si}}$$ (ligning E)

ΔT er målt temperaturdifferanse mellom inne- og uteluften, gitt av ligning F

$$\Delta T = T_{\text{inne}} - T_{\text{ute}}$$ (ligning F)

T_{inne} er målt innendørs lufttemperatur

T_{ute} er målt utendørs lufttemperatur