



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Master i konstruksjoner og materialer med fordypning innen bygg

Vårsemesteret, 2012

Åpen

Forfatter: Ingebjørg Strøm Berg

.....
(signatur forfatter)

Fagansvarlig: Knut Jonas Espedal

Veileder(e): Jorunn Merete Rønnevik, Sweco

Tittel på masteroppgaven:

Kuldebroers rolle ved rehabilitering av Gand Videregående Skole utfordringer, løsninger og nytteverdi

Engelsk tittel:

The role of thermal bridges in refurbishing Gand Secondary School challenges, solutions and practical value

Studiepoeng: 30

Emneord:

Kuldebroer
Rehabilitering
Termografering
Varmegjennomgang
Therm

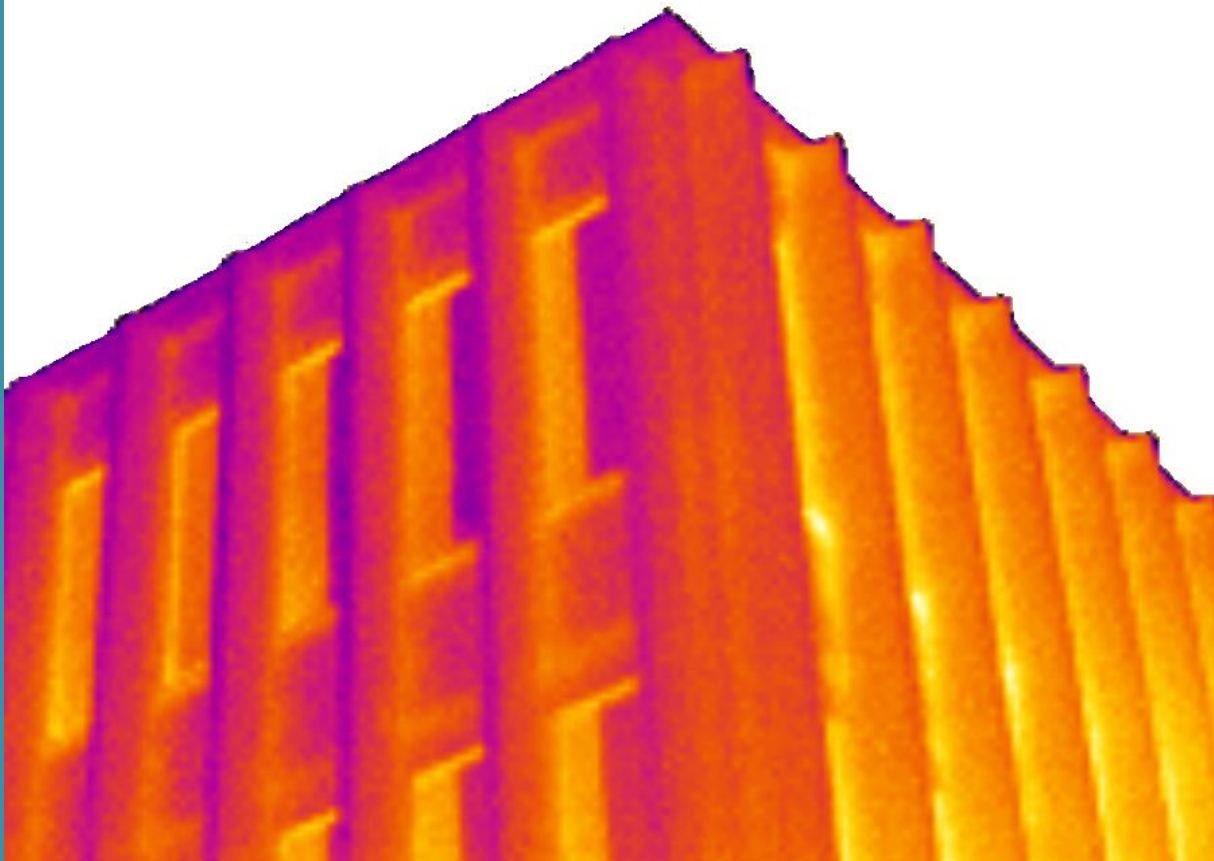
Sidetall: 91

+ **vedlegg/annet:** 8 (A - H)

Stavanger, 14. juni 2012

KULDEBROERS ROLLE VED REHABILITERING AV GAND VIDEREGÅENDE SKOLE

UTFORDRINGER, LØSNINGER OG NYTTEVERDI



Institutt for
Konstruksjoner og Materialer
Universitetet i Stavanger

Masteroppgave for
Ingebjørg Strøm Berg
Våren 2012

Forord

Denne oppgaven er skrevet våren 2012 som avslutning på en toårig mastergrad ved Universitetet i Stavanger. Oppgaven utgjør 30 studiepoeng og er skrevet ved Institutt for Konstruksjoner og Materialer der jeg tar mastergraden min med fordypning bygg. Bachelorgraden min har jeg fra energiteknologi ved Høgskolen i Bergen, og motivasjonen for denne oppgaven har vært å kombinere disse to temaene ved å studere transmisjonstap gjennom en bygningskropp. Mer spesifikt har jeg valgt å konsentrere meg om kuldebroer da jeg føler at dette er en problemstilling som blir stadig mer aktuell, men som jeg kunne lite om fra før.

Proessen med å skrive oppgaven har vært lærerik, og jeg har opparbeidet meg ny innsikt innen et tema jeg interesserer meg for. Jeg har også fått muligheten til å prøve meg på termografering, samt lært å bruke programmene Therm og Window.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder ved Sweco i Bergen Jorunn Merete Rønnevik. Hun har hjulpet med termografering og gitt moralsk støtte og faglige innspill gjennom hele prosessen. Jeg vil også takke hele Stavangeravdelingen til Sweco som har huset meg, fødd meg og hindret meg i å miste forstanden det siste halve året. Andre som fortjener en takk, er Per Halle ved Rogaland Fylkeskommune, Rune Kilen og Arnstein Bøe, vaktmestere ved Gand Videregående Skole, Svein Reusmann Tellefsen og Inger Andresen ved Link Arkitektur samt Karl Grimnes ved Termografi og Måleteknikk AS. Sist, men ikke minst vil jeg takke min veileder ved Universitet i Stavanger Knut Jonas Espedal for nyttige veiledninger og innspill gjennom hele oppgaven.

Sammendrag

Gand Videregående Skole i Sandnes skal gjennom en omfattende rehabilitering og ombygging. Skolens hovedbygg fra 1968 ønskes beholdt av Rogaland Fylkeskommune, men må oppgraderes betraktelig for å tilfredsstille dagens krav. Dette medfører en rekke utfordringer blandt annet med tanke på transmisjonstap fra bygningskroppen.

Denne oppgaven tar for seg kuldebroers rolle i energiregnskapet i 2. 3. og 4. etasje i hovedbygget. I forbindelse med dette gis en gjennomgang av teori rundt aktuelle tema som kuldebroer, ulike typer etterisolering, og en oversikt over lover og forskrifter som er relevante ved energiberegninger og rehabilitering av bygninger. Byggets varmetap er studert gjennom termografering, beregninger og simulering i Therm på bakgrunn av originale byggetegninger. Termograferingen, som er den eneste metoden som forteller noe om den faktiske situasjonen i bygget, avdekket ingen konstruksjonsfeil eller områder med manglende isolasjon. Varmebildene gav imidlertid inntrykk av generelt lite isolasjon i fasader, og kuldebroer var lett synlige. Dette stemmer godt overens med tegningsgrunnlaget og er dermed med på å bekrefte gyldigheten av utførte beregninger.

Fra beregninger er det fastslått at om lag 23 % av byggets netto oppvarmingsbehov kommer fra kuldebroer. Dette gir en normalisert kuldebroverdi på $0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, noe som er høyt sammenlignet med normtallet i NS 3131:2010 på $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Normtallene i standarden er imidlertid hovedsakelig ment for nye bygg, og denne oppgaven viser at andre metoder bør benyttes ved energiberegninger i eldre bygninger.

Ved innvendig etterisolering av fasader og utvendig etterisolering av tak vil de fleste av byggets kuldebroer reduseres. Dette gjelder ikke kuldebroer forårsaket av etasjeskiller der ekstra isolasjon ikke kommer til, og kuldebroverdien her vil øke ved etterisolering. Totalt sett reduseres likevel den normaliserte kuldebroverdien, selv om kuldebroer utgjør en større andel av byggets totale transmisjonstap.

For å redusere varmetap fra kuldebroer ytterligere ved etterisolering, kan det tilføres ekstra isolasjon over de kuldebroene som har størst innvirkning på byggets totale varmetap. For Gand Videregående Skole gjelder dette kuldebroer forårsaket av vertikale ribber i fasaden, overgang mellom tak og vegg, og ved etasjeskiller. Kuldebroer forårsaket av ribber og ved overgang til tak er enkle å forbedre da de ikke medfører store ekstrakostnader eller redusert fleksibilitet for

byggets brukere. Forbedring av kuldebroer ved etasjeskiller krever derimot mye plass og ekstra kostnader, og utbedring av disse bør ikke prioriteres.

Innhold

Forord	5
Sammendrag	6
Innhold	9
Figuroversikt	11
Tabelloversikt	12
Definisjoner og nøkkelbegreper	13
1 Innledning	15
1.1 Bakgrunn for oppgaven.....	15
1.2 Målet med oppgaven	15
1.3 Avgrensning.....	16
1.4 Oppgavens oppbygning.....	17
1.5 Metode	18
2 Teori	20
2.1 Hva er kuldebroer?	20
2.2 Lover og forskrifter	24
2.2.1 <i>Lover og forskrifter for energiberegninger</i>	24
2.2.2 <i>Lover og forskrifter for rehabilitering av eksisterende bygg</i>	28
2.3 Grunnprinsipper ved rehabilitering og etterisolering	29
2.4 Gjennomgang av tidligere rehabiliteringsprosjekter	31
2.4.1 <i>AØF Kongressenter i Trondheim</i>	31
2.4.2 <i>NVE-bygget – Totalrehabilitering av fredet kontorbygg</i>	33
2.5 Infrarød termografi	34
2.6 Therm.....	38
3 Gand Videregående Skole	41
3.1 Gand i dag	41
3.2 Redegjørelse for innsamling av data.....	45
3.3 Resultater fra termografering	48
3.3.1 <i>Fasadebilder</i>	49
3.3.2 <i>Innvendige bilder</i>	53
3.3.3 <i>Oppsummering</i>	56

3.4	Presentasjon av resultater fra beregninger i Therm	56
4	Vurdering av data og forslag til forbedringer.....	62
4.1	Kulderoer og deres påvirkning av etterisolering.....	62
4.2	Forslag til ytterligere forbedring av kuldebroer	66
4.3	Varmetap	69
4.4	Økonomisk bærekraft av kuldebroereduserende tiltak	74
4.4.1	Alternativ 1.....	75
4.4.2	Alternativ 2	76
4.4.3	Alternativ 3.....	77
4.4.4	Alternativ 4.....	78
4.4.5	Oppsummering.....	79
4.5	Brukerkomfort og innvendig utforming.....	80
5	Konklusjon og drøfting	83
5.1	Drøfting av resultater i forhold til problemstilling.....	83
5.2	Drøfting av resultater i forhold til metode.....	86
5.3	Konklusjon.....	88
	Referanser	90
	Vedlegg.....	92

Figuroversikt

Figur 1. Eksempel på varmetap gjennom en vegg med kuldebro	21
Figur 2. Illustrasjon av kuldebroer i en toetasjes bygning med kjeller	22
Figur 3. AØF Kongressenter i Trondheim.....	32
Figur 4. Innvendige og utvendige bilder av de buede fasadene til NVE-bygget.....	33
Figur 5. Utgående stråling fra ugjennomskinnelig objekt	35
Figur 6. Betydningen av reflektert stråling.....	36
Figur 7. Kjele med varmt vann og elektrikertape.....	37
Figur 8. Tverrsnitt av fasadedetalj på Gand videregående skole	39
Figur 9. Kart over Gand Videregående Skoles avdeling i Hoveveien	41
Figur 10. Plantegning over fjerde etasje i hovedbygget ved Gand vgs.	42
Figur 11. Inngang til hovedbygget ved Gand Videregående Skole.....	43
Figur 12. Varmebilde av innvendig vegg i hovedbyggets 4. etasje	44
Figur 13. Måling av forskjell i trykk inne og ute.	47
Figur 14. Punkt A, B og C	48
Figur 15. Hjørne mellom nord- og østfasade	50
Figur 16. Østfasade med markerte kuldebroer fra etasjeskille og tak	50
Figur 17. Geometrisk vertikal kuldebro i hjørnet av bygget.....	51
Figur 18. Kuldebro under brystningsplatene i andre etasje	52
Figur 19. Gradvis overgang mellom infrarødt og synlig lys.....	52
Figur 20. Utdrag fra tegningsnummer 256.06. Datert 12. februar 1969.	53
Figur 21. Gulvflate i nordøstre hjørne.	54
Figur 22. Ribbekonstruksjon i nordøstre hjørne.....	55
Figur 23. Infiltrasjon rundt vindu på nordfasade.....	55
Figur 24. Temperaturfordeling i tverrsnitt ved ulik grad av etterisolering.	72
Figur 25. Varmefluks ved kuldebro i overgang mellom etasjeskillet og vegg.....	82

Tabelloversikt

Tabell 1. Beregningsmetoder for lineær varmegjennomgangskoeffisient.....	23
Tabell 2. Oversikt over aktuelle standarder for energi- og kuldebroberegninger i bygg.....	25
Tabell 3. Standardverdier for normalisert kuldebroverdi	27
Tabell 4. Fordeler og ulemper ved ulike metoder for etterisolering av bygninger	30
Tabell 5. Fordeler og ulemper ved bruk av dobbelfasade	32
Tabell 6. Beregning av kuldebroverdi Ψ	40
Tabell 7. Informasjon om materialer fra søknad om byggetillatelse	45
Tabell 8. Sammenligning mellom prøvekrav og forholdene på Gand.....	46
Tabell 9. Klimadata under termografering.....	48
Tabell 10. Differanse mellom innvendige temperaturer	48
Tabell 11. Antatt størrelse på kuldebroer i bygget basert på erfaringer fra termografering	56
Tabell 12. Filmkoeffisienter brukt i beregningene i Therm.....	57
Tabell 13. Kuldebroer med høyeste og laveste verdi basert på feilmargin	59
Tabell 14. Nøkkeltall for blokken. Basert på tegninger samt beregninger i Therm og Simien.....	60
Tabell 15. Sammenligning av resultater fra termografering og beregning.....	63
Tabell 16. Oversikt over eksisterende konstruksjon, med antatte oppgraderinger	63
Tabell 17. Sammenligning av transmisjonstap før og etter oppgradering	64
Tabell 18. Endring i kuldebroverdier ved oppgradering til TEK 10 standard.....	65
Tabell 19. Kuldebroverdier for ulike isolasjonstykkelser over og under etasjeskillet	67
Tabell 20. forslag til ytterligere reduksjon av kuldebroer	68
Tabell 21. Kuldebroverdier før og etter ekstra isolering og kuldebroreduserende tiltak	70
Tabell 22. Nøkkeltall for bygget før og etter etterisolering og kuldebroreduserende tiltak.....	73
Tabell 23. Material- og arbeidskostnader for Alternativ 1.....	75
Tabell 24. Material- og arbeidskostnader for Alternativ 2.....	76
Tabell 25. Material- og arbeidskostnader for Alternativ 3.....	78
Tabell 26. Material- og arbeidskostnader for Alternativ 4.....	78
Tabell 27. Sammenligning av alternativene for utbedring av kuldebroer	79
Tabell 28. Innvendige overflatetemperaturer ved $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	81

Definisjoner og nøkkelbegreper

BRA: Bruksarealet til et bygg utgjør bruttoarealet (BTA) minus arealet av ytterveggene (NS 3940:2012). Dette vil si det summerte innvendige flatearealet for alle byggets etasjer dersom det ikke hadde hatt noen innvendige vegger. Bruksarealet avrundes og oppgis i kvadratmeter.

Emissivitet: Forholdet mellom utstrålt effekt fra en materialoverflate og utstrålt effekt fra et svart legeme med samme temperatur (Infrared training centre, 2007). Emissiviteten til et objekt angis med et tall mellom 0 og 1, der 1 indikerer et perfekt svart legeme.

Infiltrasjon: Utsiktet luftveksling gjennom utettheter i klimaskjermen utenom ventilasjonssystemet (NS 3031:2010, s. 7). Dette vil si trekk gjennom fasader og tak som følge av at materialer og overganger ikke er tette. Infiltrasjonen til et bygg betegnes med begrepet lekkasjetall som har benevnningen 1/h. Lekkasjetallet angir antall luftskifter i timen over klimaskjermen med en trykkforskjell på 50 Pa.

Isoterm: Punkter, linjer eller områder som beskriver temperaturen eller den tilsynelatende temperaturen på et bilde (NS-EN 13187:1998). Temperaturer kan for eksempel beskrives ved ulike farger, eller ved linjer som minner om høydekotene på et kart.

Konduktivitet/varmeledningsevne: Den varmestrøm i Watt som går gjennom 1 m^2 av et 1 m tykt, homogent materiale, når temperaturdifferansen mellom de to beregningsflatene er 1 Kelvin (Norsk forening for varme-, 1984, s. 8). Varmekonduktiviteten til et materiale oppgis i $\text{W}/(\text{mK})$, og betegnes med symbolet λ .

Kuldebrobryter: En kuldebrobryter er et sjikt av varmeisolerende materiale som er lagt inn i en konstruksjon for å redusere virkningen av kuldebroen (SINTEF Byggforsk, 2008, s. 10).

Normalisert kuldebroverdi: Samlet stasjonær varmestrøm fra kuldebroer dividert med oppvarmet del av BRA (NS 3031:2010, s. 8). Med samlet stasjonær varmestrøm fra kuldebroer menes summen av alle byggets kuldebroverdier multiplisert med deres respektive lengder.

Spesifikt oppvarmingsbehov: I denne sammenheng er spesifikt oppvarmingsbehov ment som årlig oppvarmingsbehov per bruksareal. Dette gir benevnningen kWh/m^2 .

TEK 10: Forskrift om tekniske krav til byggverk (byggteknisk forskrift). Forskriften er gjeldene fra 1. juli 2010.

Transmisjonstap: Overført effekt gjennom klimaskjermen.

U-verdi: Varmegjennomgangskoeffisienten eller U-verdien angir stasjonær varmestrøm dividert med arealet og temperaturforskjellen mellom hver side av et system (NS 3031:2010, s. 9). U-verdien oppgis i $W/(m^2K)$.

Varmebilde: Bilde som produseres av et målesystem for infrarød stråling, og som gjengir fordelingen av den tilsynelatende strålingstemperaturen på en overflate (NS-EN 13187:1998, s. 4).

Varmefluks/varmestrømstetthet: Mengde varmeenergi avgitt, transmittert eller mottatt per arealenhet og per tidsenhet (NS-EN ISO13943:2010).

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Det har lenge vært en nasjonal enighet om at dersom Norge skal være i stand til å nå de klimamålene som er satt frem mot 2020, kreves det betydelige kutt i byggesektorens energiforbruk. På mandat fra Olje- og energidepartementet konkluderte Lavenergiutvalget i sin rapport "Energieffektivisering" fra 2009 med at det er mulig med en halvering av byggesektorens samlede energibruk over en 30 års periode. For at dette potensialet skal kunne realiseres, kreves strengere krav til nybygg, enøk tiltak i øvrig bygningsmasse samt en betydelig satsing på energieffektivisering ved større rehabiliteringer (Enova, 2012).

Norske skolebygg er et område med stort forbedringspotensial, både i form av energisparingstiltak, kvalitet og trivsel. Mennesker påvirkes av miljøet rundt dem, og også elevers lærelyst stimuleres av visuelle inntrykk. Etter sitt arbeid som leder for forskningsrådsprogrammet "Evaluering av Reform 97" hevder Birgit Cold ved NTNU at mørke, trange og rotete rom uten naturelementer eller pynt gir elever en nedstemt følelse. Godt dagslys, kunstnerisk utsmykking og glade farger derimot er elementer som øker trivsel blant elevene og er med på å skape et bedre læringsmiljø. I en artikkel skrevet av forskning.no spør hun "Når vi tilbyr barn og unge stygge skoler, viser vi at vi ikke bryr oss om dem. Hvorfor skal de være villig til å yte noe i disse bygningene når de leser i veggene at omgivelsene ikke har respekt for dem?" (Jakobsen, 2002).

For at en skolebygning skal bli en optimal læringsinstitusjon kreves det med andre ord mer enn bare gode lærere og lærebøker. Bygningen skal gi inspirasjon, motivasjon og trygghet. Ved å oppgradere eldre skolebygg skapes et bedre inneklima, økt trivsel og redusert energibruk. Samtidig signaliseres det en holdning til elevene om at miljøet rundt oss er noe det er verdt å ta vare på, både i et globalt perspektiv og innen skolens fire vegger.

1.2 Målet med oppgaven

I denne oppgaven belyses kuldebroers rolle i energiregnskapet ved hovedbygget på Gand Videregående Skole. Nåværende situasjon i bygget gjøres rede for og utforskes med en praktisk tilnærming gjennom termografering. Dette sammenlignes med teoretiske beregninger basert på tegningsgrunnlag og simuleringer i Therm og Simien. I løpet av oppgaven vil det bli gitt svar på følgende nøkkelspørsmål rundt dette hovedbygget:

- Hvor stort er transmisjonstapet gjennom bygningskroppen i dag, og hvor mye av dette kommer fra kuldebroer?
- Hvordan vil kuldebroene i bygget påvirkes av etterisolering?
- Hvilke tiltak utover etterisolering kan gjøres for å minske kuldebroene i bygget?
- Vil eventuelle ekstratiltak rettet mot kuldebroer være fornuftige med tanke på kostnad, reduksjon i varmetap, og økt brukerkomfort?

Disse fire spørsmålene er komprimert til problemstillingen: *Kuldebroers rolle ved rehabilitering av hovedbygget på Gand Videregående Skole - utfordringer, løsninger og nytteverdi*. Dette besvares utover i oppgaven sammen med drøfting av usikkerheter ved beregninger og antakelser, samt deres innvirkning på resultatene.

1.3 Avgrensning

For å begrense omfanget av oppgaven har det vært nødvendig å gjøre enkelte valg i forhold til hva som skal stå i fokus, og hva som kan holdes utenfor. Et viktig valg som ble gjort tidlig i samarbeid med veiledere, har vært å se bort i fra første etasje i skolens hovedbygg. Det betyr at denne oppgaven kun tar for seg byggets tre øverste etasjer. Årsaken til dette valget har vært todelt. En grunn er at første etasje vil henge sammen med de nye skolebygningene på en eller annen måte etter oppgraderingen av skolen. Hvordan denne overgangen vil bli, er imidlertid ukjent, hvilket ville føre til stor usikkerhet ved beregning av kuldebroer for denne delen. Den andre årsaken til dette valget, er at første etasje ble bygget flere år før de resterende etasjene. Dermed skiller den seg vesentlig ut fra resten av bygget i form av størrelse, konstruksjon, bruk og arkitektonisk uttrykk. Ved å se bort fra byggets første etasje, får bygget ingen kuldebroer mot grunnen, hvilket vanligvis utgjør en betydelig andel av et byggs normaliserte kuldebroverdi.

Et annet valg som er foretatt i denne oppgaven, er å ikke holde seg oppdatert på det kontinuerlige arbeidet som blir gjort i forbindelse med planlegging for oppgradering av skolen. Forprosjektet for dette arbeidet sto ferdig 26. oktober 2011 og gav en foreløpig løsning på hvordan den nye skolen kan utformes. På grunn av økonomiske årsaker bestemte likevel Rogaland Fylkeskommune at prosjektet skulle legges på hyllen på ubestemt tid. Etter nyttår ble denne avgjørelsen endret nok en gang, og arbeidet med å videreutvikle forprosjektet og spesifisere kostnader startet igjen. For å slippe å gjøre kontinuerlige endringer i oppgaven er det valgt å se helt bort ifra all ny informasjon angående planer for skolen. Deler av forprosjektet er

lagt til grunn for antakelser angående etterisolering og utskiftning av vinduer, samt kostnaden ved dette, men alle endringer etter 1. januar 2012 er ikke vurdert.

En tredje viktig avgjørelse har vært å se helt bort i fra byggets tekniske anlegg og i hvilken grad dette må skiftes ut. Ventilasjonskanaler og elektrisk ledningsnett vil til syvende og sist ha stor innvirkning på hvilke løsninger som kan velges i form av etterisolering, samt kostnaden av dette. Manglende informasjon om det eksisterende anlegget og hvilken tilstand dette er i, har vært hovedårsaken til denne forenklingen.

1.4 Oppgavens oppbygning

Denne masteroppgaven består av de fem hovedkapitlene: Innledning, Teori, Gand Videregående Skole, Forslag til forbedringer og Konklusjon og drøfting. Dette første kapittelet gir en oversikt over oppgavens målsetting samt hva som er lagt vekt på ved arbeidet, og hvordan oppgaven er løst.

I kapittel to blir det gjennomgått aktuell teori om kuldebroer, termografering, programmet Therm, samt andre temaer som er relevante for denne oppgaven. Dette kapittelet er ment å gi et teoretisk bakteppe om problemstillinger som er vesentlige for resten av oppgaven. Dette innebærer utarbeiding av et konsekvent vokabular, samt oppretting av et grunnlag for forklaring av enkelte beregningsmetoder og analyser som er gjort senere i oppgaven.

I kapittel tre blir det gitt en detaljert beskrivelse av hovedbygget ved Gand Videregående Skole slik det står i dag. Dette omfatter en visuell beskrivelse av bygget samt en kort oversikt over hvilken informasjon som finnes i tilgjengelig dokumentgrunnlag. Kapittel tre gir også en oversikt over transmisjonstapet i bygget samt en redegjørelse for hvordan dette er funnet ved beregninger og termografering.

I kapittel fire blir resultatene som er presentert i kapittel tre drøftet ytterligere. Her gis det også oversikt over hvilke tiltak som må utføres for at skolen skal møte dagens krav med tanke på transmisjonstap, og hvordan disse vil virke inn på kuldebroene i bygget og byggets totale energibruk. Det gis også et forslag til hvordan byggets kuldebroer kan reduseres ytterligere, og det vurderes hvordan disse tiltakene kan påvirke økonomi, varmetap og bruksverdi.

Kapittel fem gir en drøfting av funnene i henhold til metode og oppgavens problemstilling. Kapittelet konkluderer også med hvorvidt ytterligere utbedring av kuldebroer i bygget kan forsvares.

Vedlagt oppgaven finnes relevante beregninger og simuleringer fra ulike tverrsnitt. Det er også vedlagt ekstra informasjon som er relevant for termograferingen. Alle vedleggene er henvist til i teksten der disse er ment å gi utfyllende informasjon.

1.5 Metode

I oppgaven vurderes transmisjonstapet i en del av et eksisterende bygg. Varmetapet har blitt undersøkt grundig ved hjelp av termografering, studier av originale byggetegninger, og simuleringer på bakgrunn av dette. Resultatene av termograferingen og simuleringene blir deretter vurdert opp mot hverandre, og ulikheter og feilkilder blir drøftet. På bakgrunn av dette, har målsetningen vært å få et bilde av fremtidig varmetap i bygget og gi en vurdering av hvordan dette kan påvirkes. Samlet kan denne fremgangsmåten klassifiseres som en kvalitativ analyse der målet har vært å forstå et spesifikt fenomen kontra innsamling av empiriske data. Dette betyr at konklusjonene fra denne oppgaven ikke uten videre kan overføres til andre bygninger. Ut fra dette er det heller ikke mulig å trekke noen generell konklusjon om viktigheten av kuldebroer.

Flere hjelpemidler er benyttet parallelt ved innhenting og vurdering av data. De tre viktigste metodene har vært termografering, simuleringer av kuldebroer i Therm og Window, samt dynamiske beregninger av årlig transmisjonstap gjort i programmet Simien. Hver av disse tilnærmingene har sine ulemper og usikkerheter, hvilket i seg selv har vært hovedmotivasjonen for å benytte ulike tilnæringsmetoder.

Termografering har vært en viktig del av analysen da dette er den eneste metoden som sier noe om den faktiske situasjonen i bygget. Likevel innebærer metoden mange fallgruver, og det kreves lang erfaring for å beherske metoden fullt ut. En annen ulempe med termografering er at det er svært vanskelig å si noe spesifikt om kuldebroverdier ved å tolke varmebilder. Varmebildene er også lett påvirkelige av andre faktorer som for eksempel vind. Dette fører til stor usikkerhet rundt resultatene.

Simuleringer i Therm har vært nyttig som basis for å fastslå spesifikke verdier for byggets kuldebroer. Dette programmet gir også mulighet til å se temperaturkurver og hvordan energi

beveger seg gjennom et tverrsnitt. Dette gjør Therm godt egnet til å lokalisere hvilke komponenter som er kritiske for resultatet, og programmet gir en god intuitiv forståelse av konduktiv varmetransport gjennom faste stoffer. En ulempe ved bruk av Therm, er at man er avhengig av å ha et korrekt tegningsgrunnlag for at simuleringen skal gi et riktig bilde av situasjonen. I tilfeller der dette ikke har vært tilgjengelig, har simuleringen måtte baseres på antakelser om hvordan et tverrsnitt ser ut. Når dette har vært nødvendig, har tips og erfaringer fra kompetente personer vært til god hjelp.

Simien er et dynamisk beregningsprogram som simulerer energibruk og inneklime i bygg eller bestemte soner. Dette programmet gjør det enkelt å beregne byggets årlige transmisjonstap basert på klimadata fra Sandnes. Simien kan kun brukes etter at U-verdier og kuldebroverdier, samt størrelse og retning på byggets komponenter er fastsatt, og programmet sier altså ingen ting om riktigheten av disse verdiene. Simien er med andre ord kun brukt for å illustrere samlet varmetap og betydningen av byggets kuldebroer på årsbasis.

2 Teori

2.1 Hva er kuldebroer?

Det er flere måter å definere begrepet kuldebro på, men som basis for denne oppgaven har jeg valgt å forholde meg til følgende definisjon gitt av SINTEF Byggforsk i prosjektrapport 25:

En kuldebro er en del av omsluttende konstruksjon der den ellers ensartede varmemotstanden endres betydelig av en eller flere av punktene nedenfor:

- *Hel eller delvis gjennomtrengning av den omsluttende konstruksjonen av materialer med høyere konduktivitet*
- *En endring av konstruksjonens tykkelse*
- *En forskjell mellom innvendig og utvendig areal, som ved overganger mellom vegg/gulv/tak*

(Gustavsen et al., 2008, s. 9)

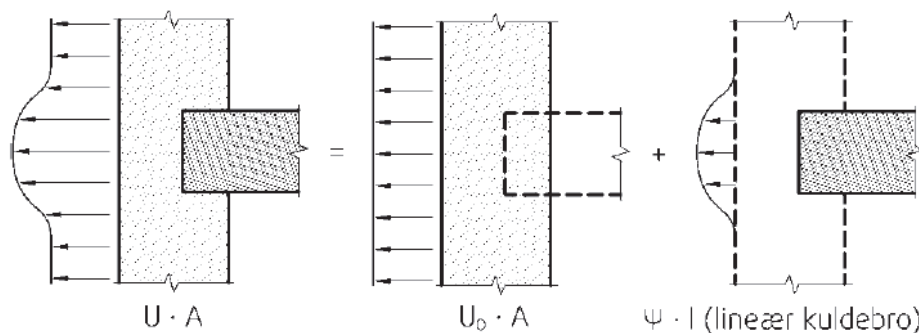
Med andre ord betyr dette at en kuldebro er et sted i en konstruksjon der varmegjennomgangen endres. Dette kan følge av en endring av materialbruken i tverrsnittet, eller av den geometriske fasongen på konstruksjonen. En kuldebro kan medføre økt varmetap i bygget, samt redusere byggets brukskomfort. Store kuldebroverdier kan også medføre fuktproblematikk, svekking av materialer og ujevnheter i farge og tekstur som følge av temperaturforskjeller (Espedal, 2005). De mest drastiske konsekvensene av kuldebroer er likevel ikke vanlige i moderne bygninger. Det har blitt stadig mer fokus på kuldebroer i byggtekniske forskrifter, og resultatet har vært bruk av kuldebrobrytere ved etasjeskiller og andre konstruksjonsdeler der det før har vært vanlig å benytte gjennomgående stål- eller betongbjelker. Mens kuldebroer tidligere ble sett på som et praktisk problem som svekket konstruksjonen og brukerkomforten i bygget, er det i dag større fokus på energitap forårsaket av kuldebroer. Denne utviklingen, samt skjerpede krav til generell varmeisolasjon i bygninger, har ført til at begrepet "kuldebro" har endret seg. Det som tidligere ble betraktet som en "løst kuldebro", en problemløsning basert på for eksempel bruk av kuldebrobryter, vil i dag fremdeles regnes som en kuldebro i mange tilfeller. Dette er fordi kuldebroer vil utgjøre en større andel av det totale varmetapet i en bygning når den generelle isoleringen bedres.

Mangelen på en klar definisjon som spesifiserer hvor stor endring i varmeledningsevne som kreves for at en detalj skal kalles en kuldebro, fører også til mange såkalte "kuldebrofrie

konstruksjoner”. I SINTEF Byggforsks Prosjektrapport 25 blir imidlertid kuldebrofrie konstruksjoner omtalt som en sannhet med modifikasjoner, da de fleste tilslutningsdetaljer vil medføre et ekstra varmetap, for eksempel på grunn av geometri (Gustavsen et al., 2008).

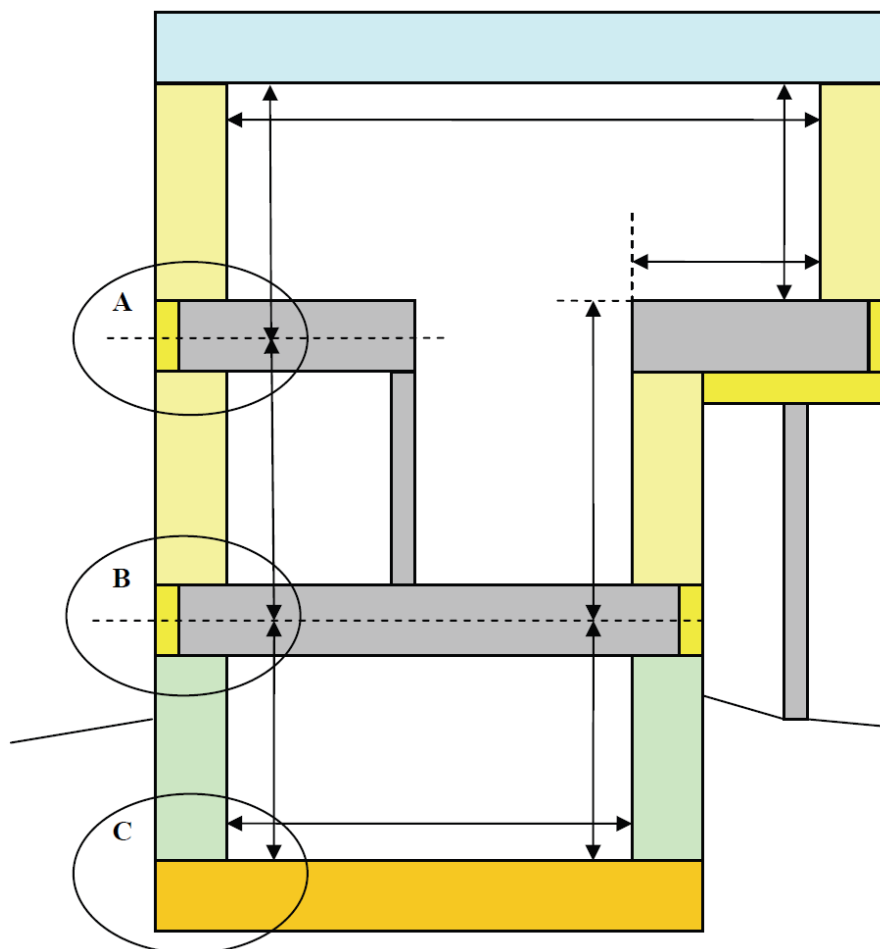
Det er vanlig å omtale kuldebroer som noe utelukkende negativt, og ordet ”kuldebro” indikerer nettopp et dårlig isolert område som fungerer som en slags motorvei for varmetap. I prinsippet kan imidlertid en kuldebro like gjerne være et sted med bedre isolasjon enn den omkringliggende konstruksjonen og altså være et sted med lavere varmegjennomgang. Siden dette medfører liten eller ingen negativ effekt for konstruksjonen eller brukeren, er det ikke vanlig å vektlegge disse områdene. Et unntak er geometriske kuldebroer som for eksempel hjørner, men dette kommer tilbake til senere i kapittelet.

Når det er fastslått at det eksisterer kuldebroer i en konstruksjon, er det ønskelig å bestemme omfanget av dem. Det er da vanlig å benytte symbolet Ψ (psi) for lineære kuldebroer og X (chi) for tredimensjonale kuldebroer, også kalt punktkuldebroer. Benevningene er henholdsvis $W/(mK)$ og W/K . Kuldebroverdien representerer en varmegjennomgangskoeffisient, og dette forteller hvor stort varmetap kuldebroen medfører per grad temperaturdifferanse mellom inne- og uteluft. Lineære kuldebroer må multipliseres med den aktuelle lengden for å finne det totale omfanget av kuldebroen. Dette betyr at Ψ -verdien for et etasjeskille må multipliseres med den innvendige omkretsen av bygget, mens Ψ -verdien for et hjørne må multipliseres med høyden opp til takkonstruksjonen. For tredimensjonale kuldebroer, forårsaket av for eksempel festepunktet til en søyle eller bjelke, representerer X -verdien varmegjennomgangskoeffisienten til hele den aktuelle detaljen og skal ikke multipliseres med en lengde. Figur 1 viser hvordan varmetapet over en vegg endres ved en lineær kuldebro, som for eksempel et etasjeskille.



Figur 1. Eksempel på varmetap gjennom en vegg med kuldebro. Det totale varmetap består av varmetap gjennom veggens pluss varmetapet fra kuldebroen. U_0 er veggens U -verdi, A er veggens areal, Ψ er lineær kuldebroverdi og l er lengden på den lineære kuldebroen (SINTEF Byggforsk, 2008, s. 3).

Hvilke mål som skal brukes ved beregning av lineære kuldebroverdier er fastsatt av NS 3031:2010, og vist med eksempler i Figur 2. I følge veiledningen til forskrift om tekniske krav til byggverk, TEK 10, skal kuldebroer som fremkommer gjennom konstruksjonsmåte være inkludert i U-verdien for fasadens yttervegg. Dette inkluderer blant annet stendere i en stenderverksvegg, som altså ikke skal regnes som kuldebroer (Statens byggtekniske etat, 2011).



Figur 2. Illustrasjon av kuldebroer i en toetasjes bygning med kjeller. Pilene viser hvilke mål som skal benyttes ved beregning av kuldebroverdier, mens sirklene indikerer utvalgte kuldebroer. A markerer en kuldebro der veggene over og under etasjeskillet er identiske. B markerer en kuldebro der veggene er forskjellige over og under etasjeskillet, og C markerer en kuldebro ved gulvet under grunn (Gustavsen et al., 2008, s. 27)

Som antydnet i Figur 2, er målene som benyttes svært viktige når kuldebroverdier skal beregnes. Kuldebroverdier av en bestemt detalj kan ikke ses på isolert, men er avhengig av regelverket for beregning av energitap i resten av konstruksjonen. Ved beregning av transmisjonstap skal det i henhold til NS 3031 (NS 3031:2010) benyttes innvendige mål, mens det for eksempel i Tyskland er vanlig å benytte utvendige mål (Gustavsen et al., 2008). Dette betyr at en norsk og tysk

kuldebroverdi av den samme konstruksjonsdetaljen kan være svært forskjellig, og de kan ikke uten videre sammenlignes selv om de i praksis representerer det samme varmetapet. Eksempelvis kan vi tenke oss et ordinært utadgående hushjørne. Som nevnt tidligere sier Norsk Standard at innvendige mål skal benyttes ved beregning av varmetap gjennom fasade. Siden selve hjørnet ikke har et innvendig areal blir varmetapet her ikke dekket av veggens U-verdi, og må representeres gjennom en forholdsvis høy kuldebroverdi. I Tyskland, der utvendige mål benyttes, blir imidlertid varmetapet i hjørnet representert dobbelt opp av veggens U-verdi. For å veie opp for dette må kuldebroverdien Ψ settes til å være negativ. For et innadgående hjørne vil det samme prinsippet gjelde, men her vil den norske kuldebroverdien være negativ, mens den tyske vil være positiv. Den totale varmetransportskoeffisienten for konstruksjoner mot det fri, H_D , beregnes etter NS 3031 og NS-EN ISO 10211 ut fra formelen som er vist under. De tre leddene representerer henholdsvis flater med en bestemt U-verdi multiplisert med arealet, lineære kuldebroer multiplisert med lengden, og tredimensjonale kuldebroverdier.

Formel 1. Varmetapskoeffisient, H_D , for konstruksjoner mot det fri. Formelen under er sammenslått fra formel nr. 9 (NS 3031:2010) og formel nr. 12 (NS-EN ISO 10211:2007)

$$H_D = \sum_i U_i \cdot A_i + \sum_j \Psi_j \cdot l_j + \sum_k X_k \quad [W/K]$$

Kuldebroverdiene Ψ og X kan finnes og dokumenteres på ulike måter, og de forskjellige metodene har ulik grad av usikkerhet. Tabell 1 er hentet fra side 23 i SINTEF Byggforsks Prosjektrapport 25 (Gustavsen et al., 2008) og viser forventet usikkerhet ved de ulike beregningsmetodene.

Tabell 1. Beregningsmetoder for lineær varmegjennomgangskoeffisient med forventet usikkerhet

Metoder	Forventet usikkerhet for Ψ
Numerisk beregning	± 5 %
Kuldebrotabeller	± 20 %
Manuell beregning	± 20 %
Grovestimering/normalverdier	0 – 50 %

Som Tabell 1 viser, er numerisk beregning den mest nøyaktige løsningen, og det er også den som hovedsakelig vil bli brukt utover i denne rapporten. For å benytte denne metoden må imidlertid alle detaljer være kjent, og den egner seg dermed dårlig til anslag av totalt varmetap fra

kuldebroer tidlig i en prosjekteringsfase. I en slik situasjon vil det være bedre å benytte seg av normalverdier for lineære varmegjennomgangskoeffisienter gitt i NS-EN ISO 14683:2007. Disse verdiene er ofte høyere enn de reelle, og de aktuelle detaljene er ikke alltid relevante for norske konstruksjoner (Gustavsen et al., 2008).

Kuldebrotabeller kan være et godt alternativ til numerisk beregning for mange detaljer. Dette er likevel en mindre fleksibel metode, da den tabulerte detaljen sjelden vil være identisk med den reelle. Eksisterende kuldebrotabeller er også mangelfulle når det kommer til passende detaljer for eldre bygninger. Hvor stort avvik som kan aksepteres vil da være en vurderingssak, og usikkerheten til kuldebroverdien vil være avhengig av denne vurderingen.

Numerisk beregning av kuldebroer utføres ved hjelp av et to- eller tredimensjonalt varmeberegningsprogram basert på elementmetoden. I denne rapporten benyttes Therm 6 for beregning av varmestrøm gjennom konstruksjoner. Window 6 vil også bli benyttet sammen med Therm for å beregne kuldebroverdier rundt vinduer. Disse programmene baseres på at det tegnes en skisse av den aktuelle konstruksjonsdetaljen, og materialegenskaper for de ulike sjiktene velges. Ved å legge inn ønskede temperaturer og luftskiftning langs flatene er det mulig å se hvordan varmefluksen fordeles i konstruksjonsdetaljen samt finne totalt effekttap. Selv om dette er den mest nøyaktige metoden for beregning av kuldebroverdier, er det en tidkrevende prosess som må gjentas for alle ulike kuldebroer. Denne metoden benyttes derfor sjeldent for å finne totalt varmetap gjennom kuldebroer i et bygg, men heller som et analyseringsverktøy for bestemte problemområder. Beregningsprogrammet Therm er nærmere beskrevet i kapittel 2.6.

2.2 Lover og forskrifter

2.2.1 Lover og forskrifter for energiberegninger

Som vist i Tabell 2, er det en rekke standarder å ta hensyn til ved beregning av varmetap i en bygning. I denne oppgaven vil det ikke bli gjennomgått i detalj hva hver enkelt standard omhandler, men det gis en kort oversikt over noen av de viktigste forutsetningene for beregning av kuldebroer i et bygg.

Tabell 2. Oversikt over aktuelle standarder for energi- og kuldebroberegninger i bygg.

Standardnummer	Tittel
NS 3031:2010	Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data
NS-EN ISO 14683:2007	Kuldebroer i bygningskonstruksjoner – Lineære varmegjennomgangskoeffisienter – Forenklede beregningsmetoder og normalverdier
NS-EN ISO 10211:2007	Kuldebroer i bygningskonstruksjoner – Varmestrømmer og overflatetemperaturer – Detaljerte beregninger
NS-EN ISO 13370:2007	Bygningers termiske egenskaper – Varmeoverføring via grunnen – Beregningsmetoder
NS-EN ISO 13789:2007	Bygningers termiske egenskaper – Varmetransportkoeffisienter på grunn av varmegjennomgang og ventilasjon – Beregningsmetode
NS-EN ISO 13786:2007	Bygningskomponenters termiske egenskaper – Dynamiske termiske egenskaper – Beregningsmetoder
NS-EN ISO 6946:2007	Bygningskomponenter og –elementer – Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient – Beregningsmetode
NS-EN ISO 10077:2006/2003	Beregning av varmegjennomgangskoeffisient – Del 1 og 2
NS-EN ISO 10456:2007	Byggematerialer og –produkter – Hygrotermiske egenskaper – Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarete og praktiske verdier
NS-EN ISO 15927:2003-2009	Bygningers hygrotermiske egenskaper – Beregning og presentasjon av klimadata – Del 1-6
NS-EN ISO 9251:1995	Varmeisolering – Betingelser ved varmeoverføringsforhold og materialeegenskaper – Terminologi
NS-EN ISO 9288:1996	Varmeisolering – Varmeoverføring ved stråling – Fysiske størrelser og definisjoner

I TEK 07 ble det for første gang satt krav til den samlede effekten av kuldebroer i et bygg, og dette kravet ble opprettholdt gjennom energiltaksmetoden i TEK 10. Det samlede kravet til kuldebroer i en bygning kvantifiseres gjennom begrepet normalisert kuldebroverdi (NKV eller Ψ'') og er gitt av følgende formel:

Formel 2. Normaliser kuldebroverdi. Denne utgaven av formelen er hentet fra SINTEF Byggforsks prosjektrapport nr. 25 (Gustavsen et al., 2008, s. 11).

$$NKV = \frac{\sum_i \Psi_i \cdot l_i + \sum_i X_i}{A_{BRA}} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Som formelen viser, er den normaliserte kuldebroverdien til et bygg det summerte effekttapet gjennom kuldebroer per grad temperaturdifferanse dividert på byggets oppvarmede bruksareal. I byggt teknisk forskrift settes kravet til NKV til $\geq 0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for småhus og $\geq 0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for øvrige bygninger (TEK 10). Dette er likevel ikke et absolutt krav, men et delkrav for

benyttelse av energitiltaksmetoden § 14-3. Alternativt kan et bygg innfri § 14-3 med en høyere normalisert kuldebroverdi så lenge det totale varmetapstallet til bygget ikke økes. Dette betyr at kravet til kuldebroer kan unngås ved for eksempel å bedre temperaturvirkningsgraden til varmegjenvinning av ventilasjonsluften eller installere vinduer med en lavere U-verdi. For å illustrere størrelsesforholdene, kan det opplyses at en normalisert kuldebroverdi på 0,12 W/(m²K) ved Sydbygget til Stavanger Universitetssykehus utgjør en andel på omtrent 3 % av det totale varmetapstallet til bygget. Den klart største bidragsyteren til dette tallet er varmetap via ventilasjonsluft som står for ca 70 %.

Dersom et bygg ikke klarer å innfri energitiltaksmetoden gitt i TEK, kan det likevel godkjennes gjennom energirammemetoden gitt i § 14-4. Denne metoden tar for seg byggets totale netto energibehov per kvadratmeter oppvarmet bruksareal. Energirammemetoden skiller mellom ulike bygningskategorier som sykehus, sykehjem kontorbygning etc. og har maksimumstall for netto energibehov tilpasset hver kategori. Luftmengde har stor innvirkning på dette tallet, og behovsstyrt ventilasjon er et viktig grep for at et bygg skal godkjennes etter § 14-4.

For et bygg er det som sagt valgfritt om det skal innfri energieffektivitetskravene i TEK 10 ved energitiltaksmetoden eller energirammemetoden. I tillegg til en av disse metodene må alle bygg tilfredsstillende et sett med minstekrav, gitt i § 14-5, som omhandler U-verdier for gulv, tak, yttervegg og vinduer/dører samt lekkasjetall. Minstekravene sier altså ingen ting om normalisert kuldebroverdi. Dette betyr at det er relativt enkelt for et bygg med høye kuldebroverdier å oppfylle energieffektivitetskravene i TEK ved å vektlegge forbedring av andre og større poster for varmetap eller energibehov. Ved bruk av energitiltaksmetoden er det vanlig å benytte normaliserte kuldebroverdier gitt i Tabell 3. Det bør bemerkes at disse verdiene ikke tilfredsstiller kravet til normalisert kuldebroverdi på 0,03 W/(m²K) eller 0,06 W/(m²K), med unntak av bygninger som ikke er småhus, men har bæresystem i tre. For denne metoden er det derfor vanlig å vektlegge totalt varmetapstall for bygget fremfor oppfyllelse av de enkelte postene.

Tabell 3. Standardverdier for normalisert kuldebroverdi (NS 3031:2010, s. 38)

Type bærekonstruksjon	Normalisert kuldebroverdi, Ψ'' [W/(m ² ·K)]
Bygning med bæresystem i tre.	0,05
Bygning med bæresystem i betong, mur eller stål og 10 cm kuldebrobryter i fasadene.	0,09
Bygning med bæresystem i betong, mur eller stål og 5 cm kuldebrobryter i fasadene.	0,12
<p>MERKNAD 1 Verdiene skal brukes ved forenklet beregning av kuldebroer etter ligning (10). Verdiene er primært for nye bygninger, men kan også brukes for eksisterende bygninger hvis ikke annen informasjon er tilgjengelig.</p> <p>MERKNAD 2 Bygg med 5 cm kuldebrobryter er vanlig der det brukes ytterveggskonstruksjoner med 20 cm isolasjon. For bygninger med 10 cm kuldebrobryter må det normalt brukes en ytterveggskonstruksjon med 25 cm isolasjon.</p>	

Ved numerisk beregning av kuldebroer gis det klar veiledning i NS 3031 og NS-EN ISO 10211:2007 til hva som skal tas med og hvilke avstander som skal benyttes. Fordi metode har en vesentlig innvirkning på den endelige kuldebroverdien, er det svært viktig å følge denne fremgangsmåten. Det er også viktig å ha i bakhodet hvilken metodikk som skal benyttes ved beregning av U-verdier og transmisjonstap slik at beregningene er konsekvente. I SINTEF Byggforsk sin prosjektrapport 25 nevnes spesielt følgende punkter for beregning av kuldebroverdier på konstruksjonsdetaljer over bakken:

- Når transmisjonstapet skal finnes for en vegg som inkluderer en etasjeskiller, og der veggens over og under etasjeskilleren er like, dvs. har samme U-verdi, så inngår arealet til etasjeskilleren i veggens areal. Dette medfører at kuldebroverdien som rapporteres for slike detaljer kun skyldes detaljens utforming (og ikke at etasjeskilleren areal ikke er med i beregning av transmisjonstapet). Et eksempel er en etasjeskiller i betong som trenges inn i en bindingsverksvegg. Her vil det være et ekstra varmetap på grunn av redusert isolasjonstykkelse på utsiden av etasjeskilleren.
- For etasjeskillere der det er forskjellig vegg over og under etasjeskilleren, vil hver av veggens areal beregnes inn til midten av etasjeskilleren.
- Som angitt i NS 3031 skal vindusarealet inkludere arealet av karm og ramme. Det blir da mest hensiktsmessig å inkludere mellomrommet mellom karm og losholt/stendere i veggens areal. Kuldebroverdien vil da reflektere denne måten å regne på, dvs. man antar at veggens U-verdi gjelder helt inn til utvendig karmmå. Dette gjør det også enkelt å finne

veggens areal. Merk at effekten av losholt og stendere rundt vinduer skal inngå i veggens U-verdi, og ikke kuldebroverdien.

(Gustavsen et al., 2008, s. 26)

Som punktene over viser er det viktig at den personen som utfører beregninger av kuldebroverdier, har satt seg tilstrekkelig inn i regelverket for beregningsmetoder og følger dette nøyaktig. Det er også viktig å avklare med vindusleverandører og andre fagpersoner hva de oppgitte U-verdiene egentlig inkluderer og passe på at alle områder er dekket uten å overlape hverandre.

2.2.2 Lover og forskrifter for rehabilitering av eksisterende bygg

Ved rehabilitering eller ombygging av eksisterende bygg er det betraktelig flere hensyn å ta enn ved beregning av kuldebroverdier og varmetap. I tillegg til å oppfylle TEK med hensyn til blant annet funksjon, brukervennlighet, byggverk, miljø og estetikk må den historiske verdien til bygget respekteres og ivaretas. Dette fører til at en rekke ulike fagdisipliner må på banen for å vurdere hvordan situasjonen skal løses på en best mulig måte. Hver av disse fagdisiplinene har sine standarder og retningslinjer for hvordan det ferdige resultatet bør bli, og det kan være problematisk å få alt til å passe i en eldre bygningskropp som ble bygget etter andre krav. Hovedregelen er da at det må gjøres en flerfaglig vurdering der ulike muligheter gjennomgås, og krav fra aktuelle standarder følges så langt det er praktisk mulig. Dersom det kun er mindre endringer som skal gjøres på bygget, er det også tilstrekkelig å begrense kravene til det gjeldende området. Ved renovering av kun øverste etasje i en blokk, er det for eksempel tilstrekkelig at denne etasjen følger dagens krav. Dette har likevel flytende grenser. Ved hensyn til brann må for eksempel rømningsveier fra øverste etasje og helt ut tilfredsstillende dagens krav. Konstruksjonen i de lavere etasjene må også tåle eventuelle påkjenninger som de vil kunne bli utsatt for ved brann, slik at ikke bygget kollapser (Tungesvik, 2012, personlig samtale).

Mens krav gitt av Nasjonale Standarder til en viss grad kan velges bort og nedprioriteres av fagpersoner, regnes krav gitt i TEK 10 som overordnet. Dette betyr at byggteknisk forskrift må innfris med mindre det er helt spesielle grunner til at dette ikke lar seg gjøre. Da må det sendes inn en formell søknad til kommunen der det gis særlige grunner til hvorfor TEK bør fravikes i det aktuelle tilfellet. Kommunen henter så inn uttalelser fra Direktoratet for Byggkvalitet, Fylkesmannen, Fylkeskonservatoren, Riksantikvaren, brannvesenet eller andre relevante instanser. Et eksempel på et slikt tilfelle er dersom et verneverdig bygg ikke greier å innfri

kravene til dagslys gitt av TEK 10 uten å gjøre nevneverdige endringer av fasaden. Da kan Fylkeskonservatoren konkludere med at det i dette tilfellet er viktigere å opprettholde byggets historiske verdi, og det blir gitt en dispensasjon fra å følge TEK på dette punktet.

2.3 Grunnprinsipper ved rehabilitering og etterisolering

Rehabilitering av eksisterende bygninger kan være utfordrende, og ofte viser det seg å bli mer omfattende enn opprinnelig planlagt. Grunnen til dette er at rehabiliteringsarbeidet ofte avdekker uforutsette eller skjulte feil og mangler. Hvordan et arbeid er utført samsvarer ikke alltid med tegninger, og for eldre bygg er det også varierende hvor mye dokumentasjon som fremdeles er tilgjengelig ved prosjekteringsstart. Kostnadsoverslag for rehabiliteringsprosjekter er derfor vanskelig å beregne, og budsjetter kan slå store sprekker. I tillegg til dette kan rehabiliteringsprosjekter gi dårligere resultater, fordi det ofte må tas til takke med mindre optimale løsninger på grunn av plassmangel eller krav til gjenbruk av komponenter og materialer. Når dette er sagt, kan rehabilitering av eksisterende bygg også ha stor samfunnsmessig verdi. Det arkitektoniske og historiske uttrykket til en bygning, eller en hel bydel, er i mange tilfeller noe som er verdt å bevare. Gjenbruk av energikrevende byggematerialer som for eksempel betong, kan også forsvares ut i fra et klimaregnskap.

De vanligste rehabiliteringstiltakene med innvirkning på en bygnings varmetap, er etterisolering av tak og fasader samt utskiftning av vinduer. Mindre omfattende tiltak kan være å skifte ut tettelister og vindsperrer, samt dytte inn ekstra striper av mineralull rundt karmen eller andre overganger med manglende isolasjon. Selv enkle tiltak som dette kan ha stor positiv virkning i forhold til varmetap, og spesielt kuldebroer og luftlekkasjer kan reduseres kraftig ved denne typen utbedringer.

De tre hovedkategoriene for etterisolering av fasade, er innvendig isolering, utvendig isolering samt innblåsing av isolasjon i konstruksjonens hulrom. Alle disse kategoriene har fordeler og ulemper som må tas hensyn til ved valg av metode. Tabell 4 viser en oppsummering hentet fra artikler med anbefalinger på Enova sine nettsider, som igjen har hentet sin informasjon fra SINTEF Byggforsk.

Tabell 4. Fordeler og ulemper ved ulike metoder for etterisolering av bygninger (Enova anbefaler, 2010)

	Fordeler	Ulemper
Innvendig etterisolering	<ul style="list-style-type: none"> • Ingen fasadeendring • Isoleringsarbeidet må ikke utføres samtidig for hele bygningen • Etterisoleringen kan begrenses til de kaldeste rommene • Ved god planlegging er arbeidet forholdsvis enkelt å utføre 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduserer boligarealet noe • Innvendig isolering medfører ofte innvendig oppussing siden eksisterende plater og paneler må fjernes eller bygges inn • Installasjoner og fastmonterte radiatoranlegg mot yttervegg må flyttes eller kles inn • Bygningen kan ikke brukes som normalt i byggeperioden på grunn av støv, støy etc. • Enkelte fasader tåler ikke innvendig etterisolering på grunn av fare for fuktskader • Kuldebroer reduseres ikke nødvendigvis
Utvendig etterisolering	<ul style="list-style-type: none"> • Dersom fasaden likevel skal endres eller byttes er utvendig etterisolering en relativt liten merkostnad • Bygget kan brukes som normalt under arbeidet • Boligflaten reduseres ikke som ved innvendig isolering • Luftlekkasjer og skader i ytterveggen utbedres • Kuldebroer minskes betraktelig 	<ul style="list-style-type: none"> • Større fasadeendringer skal som hovedregel byggeanmeldes • Vinduene må flyttes ut i veggen for å beholde det opprinnelige utseendet på vindusinnrammingen • Overgang mot takfot, sokkel, inngangsparti, balkonger, vinduer og lignende er detaljer som krever mer arbeid • Det kan være krevende å bevare verdifulle fasader, vinduer og bygningsdetaljer • Det må være plass på tomten til stillaser og utvidelse av bygningen • Takutstikk blir redusert
Innblåsing av isolasjon	<ul style="list-style-type: none"> • Bygget kan brukes som normalt under arbeidet • Boligflaten reduseres ikke som ved innvendig isolering • Fasadeendringer er ikke påkrevd • Denne løsningen er ofte billig 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeidet må utføres av erfarne fagfolk • Passer kun for enkelte typer konstruksjoner • Kuldebroer blir ikke nødvendigvis forbedret

Ved rehabiliteringen av Gand videregående skole er det et viktig poeng for Rogaland Fylkeskommune at det arkitektoniske uttrykket av hovedbygget skal bevares. Det er heller ikke rom for innblåsing av ekstra isolasjon i fasadekonstruksjonen, og innvendig etterisolering er

derfor den mest logiske løsningen for dette bygget. Som nevnt i Tabell 4, har dette både positive og negative sider. Et viktig punkt med relevans for denne oppgaven, er at kuldebroer ikke nødvendigvis blir utbedret ved innvendig etterisolering. Dette gjelder spesielt kuldebroer i forbindelse med etasjeskiller der etasjeskiller er forankret direkte i bærende fasadeelementer. Ved innvendig etterisolering uten ekstra utbedring av slike kuldebroer kan temperaturforskjellene på fasadens utside bli stor. Dette kan igjen medføre forringelse av byggematerialene, samt ubehag i form av kalde gulv for byggets brukere.

Et annet viktig punkt som må tas hensyn til ved all etterisolering, er fare for fukt- og frostskafer i fasadene. Dette er fordi sjiktet i veggen der duggpunktstemperatur oppnås, flyttes.

Duggpunktstemperaturen er den temperaturen som får vanninnholdet i luften til å gå over i væskeform, og er avhengig av trykk og luftens relative fuktighet. Dersom det etterisoleres uten at det tas hensyn til hvor i veggen duggpunktstemperaturen nås, kan det bli fare for fukt i isolasjonsmaterialene. Plassering av dampspærre er derfor et viktig valg. Ved innvendig etterisolering kan også temperaturen på fasadens utside senkes til under duggpunktstemperatur, slik at det legger seg kondens her. På tunge betongvegger er dette hovedsakelig et problem ved væromslag om sommeren når det går fra en lengre periode med klart og kaldt vær, og uteluften plutselig blir fuktig og betydelig varmere. I enkelte tilfeller kan det også oppstå frost på fasadene om vinteren.

2.4 Gjennomgang av tidligere rehabiliteringsprosjekter

2.4.1 AØF Kongressenter i Trondheim – Ny glassfasade over den eksisterende fasaden

I 2009 ble det bestemt at Kongressenteret til Arbeidernes Økonomiske Fellesorganisasjon, også kalt Folkets hus, i Trondheim skulle få en ny fasade av glass utenpå den eksisterende fasaden. Dette prinsippet kalles dobbeltfasade og kan benyttes for nybygg, slik det for eksempel er gjort på Statoils Vassbotnen 23 på Forus. Dette kan også benyttes for eksisterende bygninger, som i dette tilfellet. Målet for AØFprosjektet var å oppgradere fasaden til et tilfredsstillende energinivå, samt å redusere avfall i forbindelse med ombyggingen (Kilnes, 2010). I samarbeid med SINTEF Byggforsk ble det gjort et omfattende casestudie av hvordan en slik løsning vil påvirke bygget med hensyn til kondens, energibruk, romtemperatur og termisk komfort (Haase and Wigenstad, 2010). Imidlertid er prinsippet med dobbel glassfasade lite utbredt i Norge, og i følge Haase og Wigenstad (2010) fantes det i 2010 bare et par tilfeller der dette var brukt i forbindelse med rehabilitering. Dette gjør at det fremdeles mangler en del kunnskap og erfaring

rundt temaet. Figur 3 viser oppføringen av dobbelfasaden samt vinnerbidraget til utsmykkingskonkurransen for fasaden til Folkets hus.



Figur 3. AØF Kongressenter i Trondheim. Bildet til venstre viser glassfasaden under oppføring (Kilnes, 2010). Bildet til høyre viser utkastet til den engelske kunstneren Stanza som vant byggets fasadeutsmykkingskonkurranse. På glassfasaden skal det fremvises samtidsdata som samles inn på forskjellige steder i byen (STANZA).

Hovedtanken bak bruk av dobbelfasade er at en ytterfasade av glass legges utenpå den opprinnelige fasaden, med et mellomrom på ca en halv meter. Dette vil skape en termisk buffer for fasaden og redusere oppvarmingsbehovet samt støynivået i bygget. Når solen skinner på glassfasaden vil luften mellom de to sjiktene bli oppvarmet og sirkulere. Dette kan utnyttes på ulike måter sammen med byggets ventilasjonsanlegg i åpne eller lukkede løsninger. Innglassede balkonger er en mindre teknisk variant av dette prinsippet. Dette har blitt benyttet i mange eldre boligblokker, ofte som et støytiltak.

Tabell 5. Fordeler og ulemper ved bruk av dobbelfasade

Dobbelfasade ved rehabilitering av eksisterende bygning	
Fordeler	Ulemper
Omfattende arbeid på den eksisterende fasaden kan reduseres betydelig	Uegnet i prosjekter der det er ønskelig å beholde det arkitektoniske uttrykket til bygget
Bygningens oppvarmingsbehov reduseres, samtidig som solenergien kan utnyttes til oppvarming av ventilasjonsluft	Manglende kunnskap og erfaringer fra andre prosjekter
Kuldebroer i den eksisterende fasaden elimineres	Utfordrende med hensyn til kondens, brann og røykutvikling

2.4.2 NVE-bygget – Totalrehabilitering av fredet kontorbygg

NVEs administrasjonsbygg i Middelthunsgate 29 i Oslo ble oppført i 1964 og regnes i dag som et sentralt kulturminne fra norsk etterkrigstid (Anda, 2012). Deler av bygget, blant annet fasadens innside og utside, er fredet, noe som vanskeliggjorde det omfattende rehabiliteringsarbeidet betraktelig. På tross av dette, oppnådde bygget energimerke B da prosjektet sto ferdig sommeren 2011 (Harket, 2011). Dette betyr at NVE-bygget, etter rehabilitering, oppnådde en bedre energikarakter enn hva en ny bygning, bygget etter minimumskravene i TEK 07, ville ha oppnådd. Figur 4 viser bilder av fasadene etter rehabiliteringen.



Figur 4. Innvendige og utvendige bilder av de buede fasadene til NVE-bygget. Ribbekonstruksjonen er fremtredene på fasadens innside og dekket med teakplater (Anda, 2012).

Energiltak som ble gjort i NVE-bygget bestod både i forbedring av bygningskroppen, og VVS-tekniske tiltak som utskiftning av varmeovner, forbedret varmegjenvinning på behovsstyrt ventilasjonsluft og tilkobling til fjernvarmenettet. De viktigste tiltakene gjort med selve bygningsmassen, var som følger:

- Ny utvendig solskjerming på alle fasader etter mal fra eksisterende løsning på vestfasaden
- Utskiftning av vindusruter i de eksisterende karmene
- Nye tettelister rundt vinduskarmene
- Etterisolering og tetting av fasade under og mellom vindu

- Etterisolering av tak og himling i kjelleren
- Utskiftning av lyskupper i taket
- Nye klimavegger, vinduer og dører i inntrukket plan i 7. etasje (Anda, 2012)

Siden bygningen var vernet, var Riksantikvaren svært opptatt av å beholde de originale materialene, samtidig som byggets karakter skulle forbli intakt. Ved etterisolering av fasadene måtte de innvendige teakpanelene som er vist i Figur 4, tas bort. Deretter ble det tettet rundt vinduer og lagt inn ekstra isolasjon på innsiden av veggen før panelene igjen ble fastmontert. I forbindelse med rehabiliteringen ble også NVEs arealbehov redusert med 30 % som følge av mer arealeffektive løsninger (Anda, 2012).

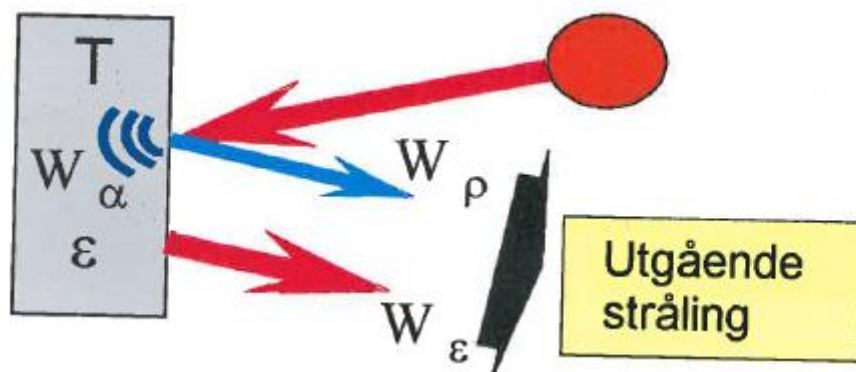
2.5 Infrarød termografi

Som en del av denne oppgaven er det benyttet infrarød termografi til å kartlegge varmetapet ved Gand Videregående Skole. Det vil derfor bli gjennomgått litt teori for å forklare hva som vises på et varmebilde, og hvordan dette kan benyttes i en slik sammenheng.

Infrared training centre, eller ITC, er en internasjonal organisasjon som spesialiserer seg på kursing og sertifisering av termografører. I kursmanualen Termografi Nivå 1 oppgir Infrared training centre (2007, s. 17) følgende definisjon for infrarød termografi: "Infrarød termografi er den vitenskap som behandler innsamling og analyse av termisk informasjon fra et avbildende berøringsfritt apparat." Det bildet som fremstilles ved termografering kalles et varmebilde, IR-bilde eller termogram, og termografi består altså av å fremstille og tolke varmebilder. Ved termografi, eller mer eksakt infrarød termografi, fanges det opp stråling i det infrarøde spekteret, og det er denne strålingen som avbildes med ulike farger på et varmebilde. Mens et øye skiller mellom ulike farger på bakgrunn av bølgelengden i det synlige lyset, oppfatter et varmekamera kun intensiteten på den infrarøde strålingen. De ulike fargene på et varmebilde sier altså ingen ting om strålingens bølgelengde, og heller ingen ting om hva strålingen kommer av.

Ved analyse av varmebilder er det viktig å tenke gjennom hva som er årsaken til den strålingen som vises på bildet. Strålingen kan komme av emisjon (ϵ), refleksjon (ρ) eller transmisjon (τ). Transmittert stråling kommer fra kilder bak det aktuelle objektet og kan ses bort i fra for ugjennomskinnelige, eller opake, objekter. Som Figur 5 viser, vil et varmebilde i de fleste tilfeller

vise en blanding av reflektert og emittert stråling. Hvor mye reflektert stråling som vises på bildet, vil være avhengig av objektets overflate og hvordan bildet er tatt i forhold til reflekterende varmekilder i nærheten.



Figur 5. Utgående stråling fra ugjennomsiktig objekt består av emitterende stråling (W_ϵ) og reflektert stråling (W_ρ) (Infrared training centre, 2007, s. 82)

Når et varmekamera har fanget opp strålingsintensiteten til et objekt regner det seg frem til antatte temperaturer ved hjelp av Stefan-Boltzmanns lov gitt i Formel 3. Deler av den registrerte strålingen vil komme av refleksjon eller transmisjon, som ikke gir et bilde av strålingen, eller temperaturen, til objektet, men kan sammenlignes med bakgrunnsstøy. Dersom det ikke tas tilstrekkelig høyde for denne typen stråling, vil altså den temperaturen som vises på bildet være feil.

Formel 3. Stefan Boltzmanns lov (Çengel and Boles, 2007, s. 94)

$$U = \sigma \cdot T^4 \Leftrightarrow T = \sqrt[4]{\frac{U}{\sigma}}$$

U = Strålingstetthet [W/m^2]

σ = Stefan-Boltzmanns konstant, $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$]

T = Absolutt temperatur [K]

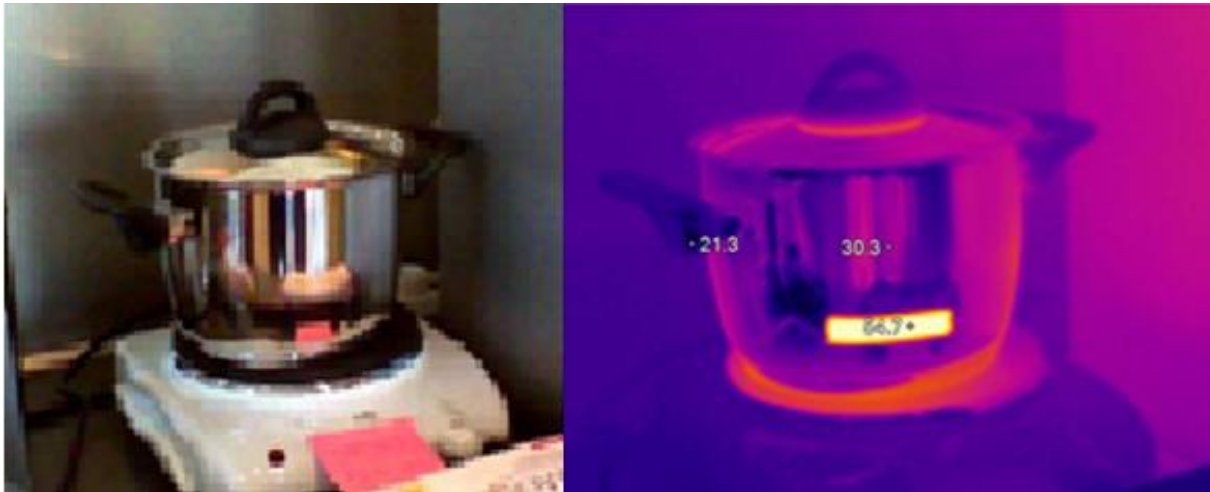
En vanlig nybegynnerfeil ved termografering er å ta bilder rett forfra slik at en selv kommer med på bildet som reflekterende varmekilde. Dette er illustrert på Figur 6 som viser et varmebilde av en vindusflate tatt rett forfra. De fleste bygningsmaterialer reflekterer heldigvis ikke like mye stråling som et vindu, men det er likevel svært viktig å huske på hva et varmebilde egentlig viser.



Figur 6. Betydningen av reflektert stråling. Bildet til venstre viser vinduet slik øyet ser det, mens varmebildet til høyre viser min egen refleksjon i ruten

Den emitterte strålingen fra et objekt er den delen som kan fortelle noe om objektets temperatur, og det er derfor denne type stråling det er ønskelig å fange opp med et varmekamera. Den emitterte strålingen er avhengig av objektets temperatur, men også dets emissivitet, og det er kombinasjonen av disse som gir den totale emitterte strålingsintensiteten. Emissiviteten til et materiale angis med et tall mellom 1 og 0, der 1 beskriver et sort legeme som er ideelt til både å absorbere og emittere stråling. Emissiviteten til et materiale kan finnes med et varmekamera ved å sammenligne og stille inn kameraet etter en kjent emissivitet, for eksempel elektrikertape med $\epsilon=0,95$. Dette er vist i Figur 7 der emissiviteten til elektrikertapen er kjent, og kameraet er innstilt etter dette. Fordi resten av kjelen har en lavere emissivitet sender den ut mindre stråling, og fremstår som kaldere på varmebildet. Ved å justere kameraet til kjelen viser en temperatur på $54,7\text{ °C}$, slik som tapen gjør i Figur 7, finnes riktig emissivitet for kjelen. Ved å benytte denne lavere emissiviteten, fortelles kameraet at det må kompensere mye på temperaturskalaen fordi objektet ikke er i stand til å emittere stråling effektivt. For å kunne finne emissiviteten til et materiale ved hjelp av det infrarøde kameraet, må det være en viss temperaturforskjell på objektet og luften rundt. Det er derfor begrenset hvilke situasjoner en slik metode kan benyttes i.

Emissiviteten til et materiale kan også finnes fra tabeller. Det kan likevel være verdt å merke seg at tabellverdier kan være unøyaktige, da emissiviteten vil være svært avhengig av overflatestruktur og påvirkes av skitt, maling, polering etc. For eksempel oppgir Fluke, produsenten av varmekameraet benyttet i denne oppgaven, i medfølgende datablad at betong har en emissivitet på 0,54. I databladet til ITC derimot er emissiviteten til betong oppgitt å ligge på mellom 0,92 og 0,97.



Figur 7. Kjele med varmt vann og elektrisk tape. Ulik emissivitet kan gi et feilaktig inntrykk av forskjellig temperatur

Foruten viktigheten av å ta hensyn til ulik emissivitet, viser Figur 7 også et annet viktig punkt ved tolkning av varmebilder. Metaller har generelt lav emissivitet, hvilket betyr at mesteparten av den strålingen kameraet oppfatter, skyldes refleksjon fra forstyrrende elementer i rommet. Dette gjør det svært vanskelig å si noe fornuftig om temperaturen til objektet, og termografering av for eksempel elektriske komponenter krever derfor mer erfaring enn termografering av bygningsdetaljer som ofte er av tre eller betong.

Standarden NS-EN 13187 gir enkelte regler og retningslinjer for termografering av bygninger. Hovedbudskapet i denne standarden er at bruksanvisningen til aktuelt utstyr skal følges, og alle relevante forhold under termograferingen skal gjøres rede for og dokumenteres. Tillegg D til standarden gir også et eksempel på et sett med prøvningskrav som er spesielt utviklet for Skandinaviske forhold. Disse prøvningskravene er lagt til grunn for termograferingen gjort i denne oppgaven og kan studeres nærmere i Vedlegg A – Prøvningskrav ved termografering i Skandinavia. Prøvningskravene omfatter temperaturdifferanse mellom inne- og uteluft, samt sikring av stabile forhold før og under termograferingen. Det er en hovedregel at stor temperaturdifferanse er gunstig da dette gjør det lettere å se uregelmessigheter i konstruksjonen. Det er også gunstig med stabile temperaturer opp til et døgn før termograferingen utføres. Dette kommer av at en bygning har relativt stor varmelagringskapasitet, og det er ønskelig at forholdene skal være så stasjonære som mulig (NS-EN 13187:1998).

2.6 Therm

Therm er et Windowsbasert dataprogram for beregning og analysering av todimensjonal varmetransport gjennom bygningskomponenter. Programmet ble utviklet i 1995 ved Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) i California i samarbeid med Windows and Daylighting Group, Building Technologies Departement og Environmental Energy Technologies Division. Siden den gang har programmet blitt oppgradert en rekke ganger, og basis for denne oppgaven har vært Therm 6.3.38 som ble lansert 19. mars 2012 (Finlayson et al., 1998).

Therm bygger på elementmetoden, som er en metode for numerisk løsning av partielle differensialligninger eller integralligninger. Dette vil si at programmet deler opp den aktuelle konstruksjonsdetaljen i en rekke knutepunkter og mindre geometriske figurer, eller elementer. På denne måten kan Therm regne seg gjennom hvert element ved å bruke de materialegenskapene og randbetingelsene som er satt av brukeren. Dette gjør det mulig å finne U-verdier for bestemte flater, isotermer og varmefluks på ulike steder i den aktuelle konstruksjonsdetaljen. Basisligningen for konduktiv varmetransport er gitt av likningen under (Finlayson et al., 1998, s. C-1):

Formel 4. Konduktiv varmetransport

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_g = 0$$

k = materialets konduktivitet [W/mK]

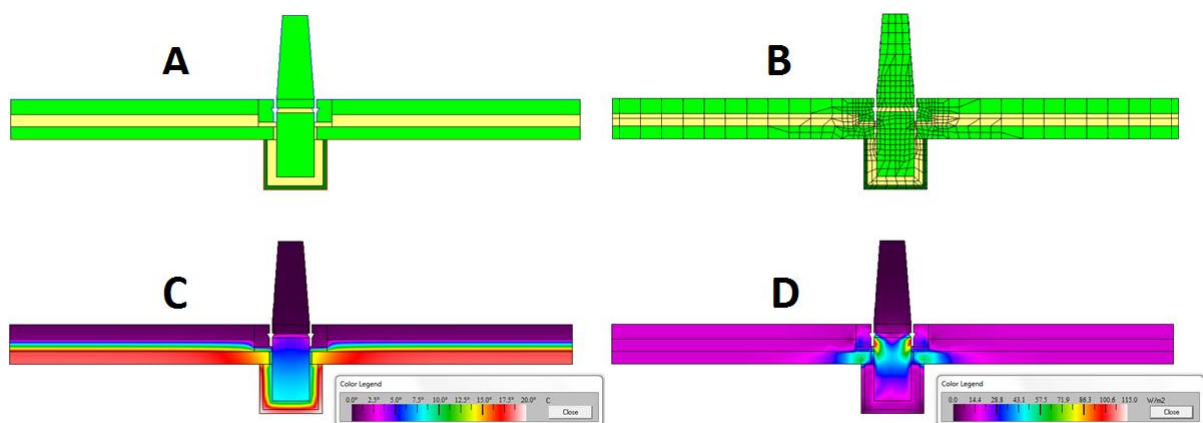
q_g = intern varmeutvikling [W]

T = temperatur ved randen [K]

Basert på antall elementer konstruksjonen deles opp i, og den interpoleringen som gjøres mellom elementene, regner Therm seg frem til en U-verdi med en tilhørende estimert feilmargin. En konstruksjonsdel med kompleks geometri vil få en høyere feilmargin enn en slett vegg ved ordinær utregning. Ved å øke antall elementer i geometrien gjør Therm en mer detaljert utregning slik at den estimerte feilmarginen reduseres. I denne oppgaven er det satt et ønske om å holde feilprosent for kuldebroverdien Ψ under ± 10 %. Avhengig av kuldebroverdiens størrelse og detaljens form tilsvarer dette en akseptert feilmargin på om lag 2 % for den U-verdien Therm oppgir for den sammensatte konstruksjonsdelen. Ved svært lave

kuldebroverdier er det akseptert en høyere feilmargin, og for enkelte tverrsnitt har det ikke vært mulig å redusere feilmarginen fordi elementinndelingen da blir mer avansert enn hva programmet greier å håndtere. Hvordan den oppgitte feilprosenten påvirker feilmarginen til kuldebroen er beskrevet i forbindelse med eksempelet gitt i Tabell 6.

En av grunnene til at Therm er spesielt godt egnet for beregning av kuldebroer er at det er kompatibelt med en rekke andre programmer, spesielt AutoCad og Window som er et analyseverktøy for vinduskonstruksjoner. Den aktuelle detaljen må tegnes manuelt i Therm, men det er mulig å bruke en eksisterende AutoCad-fil som underlag, hvilket gjør tegneprosessen raskere. Siden Therm kun regner på konduktiv varmetransport, og ikke tar for seg konveksjon og stråling, er det nødvendig å bruke programmet sammen med Window i tilfeller der vinduer er involvert. Window er, i likhet med Therm, utviklet av LBNL og fokuserer på effekten av stråling gjennom ulike lag med glass, vindusfilmer og gasslommer. Ved å kombinere Therm og Window er det dermed mulig å finne gode U-verdier for hele vinduskonstruksjonen samt analysere kuldebroer i overgangen mellom karm og vegg. Figur 8 viser en del av et fasadetverrsnitt tegnet i Therm og noen av visningsalternativene for resultatet. Å se på en detalj i flere ulike visningsmodus gir god intuitiv forståelse av hvordan energi beveger seg gjennom et tverrsnitt.



Figur 8. Tverrsnitt av fasadedetalj på Gand videregående skole. Sandwichelement med ribbe sett ovenfra.
A: Konstruksjonsdel tegnet i Therm bestående av betong, isolasjon og gips
B: Therm deler opp konstruksjonen i elementer for å finne varmegjennomgangen
C: Beregnet temperaturendring gjennom tverrsnittet [°C]
D: Beregnet varmefluks gjennom tverrsnittet [W/m²]

Når en kuldebroverdi skal beregnes ved hjelp av Therm, må det gjøres i to steg. Dette er fordi Therm kun oppgir U-verdier for valgte flater eller retninger. Tabell 6 viser fremgangsmåten for å finne kuldebroverdi forårsaket av ribben vist i Figur 8. I dette eksempelet er hele ribben betraktet som en kuldebro. Fremgangsmåten består av først å finne U-verdien for sandwichelementene og deretter U-verdien for det sammensatte tverrsnittet. Ved å multiplisere de to U-verdiene med bredden av detaljen, finnes varmetap per høydemeter. Kuldebroverdi forårsaket av ribben er differansen mellom disse varmetapene. For elementinndelingen vist øverst til høyre i Figur 8, får utregningen av U-verdien en estimert usikkerhet på $\pm 9,16\%$. Dette ligger tilsynelatende innenfor grensen for akseptert feilprosent, men kan likevel reduseres om ønskelig ved å øke elementinndelingen i Therm. I praksis vil usikkerheten på $\pm 9,16\%$ medføre at kuldebroverdien ligger et sted mellom $0,25\text{ W}/(\text{mK})$ og $0,60\text{ W}/(\text{mK})$, hvilket utgjør en total feilmargin på over 41% . Dersom den totale estimerte feilmarginen for kuldebroverdien skal reduseres til $\pm 10\%$, må altså feilmarginen for U-verdien reduseres betraktelig. Ved å øke elementinndelingen og redusere den estimerte usikkerhetsmarginen for U-verdien med ribbe til $\pm 5\%$, kan kuldebroverdien beregnes, slik at den blir liggende et sted mellom $0,33\text{ W}/(\text{mK})$ og $0,52\text{ W}/(\text{mK})$.

Tabell 6. Beregning av kuldebroverdi Ψ på grunnlag av varmegjennomgang funnet i Therm

Beregning av kuldebroverdi for sandwichelement med ribbe	
Detaljens bredde	2,25 m
Veggens U-verdi uten ribbe	$0,67\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Veggens varmetap uten ribbe	$0,67\text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot 2,25\text{ m} = 1,5075\text{ W}/(\text{mK})$
Veggens U-verdi med ribbe	$0,86\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Veggens varmetap med ribbe	$0,86\text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot 2,25\text{ m} = 1,9350\text{ W}/(\text{mK})$
Kuldebroverdi Ψ forårsaket av ribbe	$1,9350\text{ W}/(\text{mK}) - 1,5075\text{ W}/(\text{mK}) = 0,4275\text{ W}/(\text{mK})$
Estimert feilprosent for U-verdi med ribbe	9,16 %
Estimert feilprosent for kuldebroverdi	41,20 %

3 Gand Videregående Skole

3.1 Gand i dag

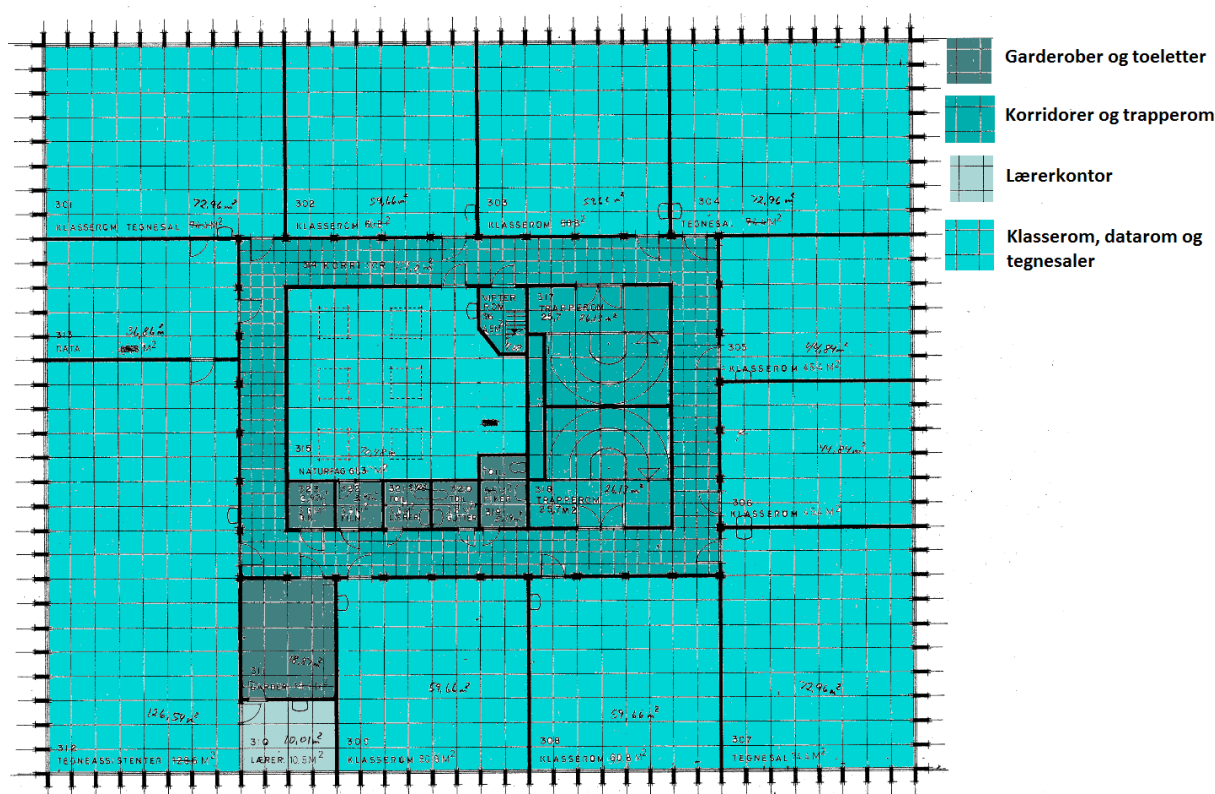
Gand videregående skole er en yrkesrettet videregående skole i Sandnes. Skolen ble opprettet under navnet "Sandnes tegneskole" i 1897, og har siden den gang hatt flere navn og lokasjoner. I dag er skolen fordelt på tre adresser, den tilbyr 9 ulike studieretninger og disponerer til sammen om lag 24 000 m² (Gand Videregående Skole, 2011b). Rogaland fylkeskommune ønsker i 2012 å oppgradere de ulike skolebyggene. Forprosjektet som innebærer en blanding av rehabilitering og nybygg, var ferdig i oktober 2011.



Figur 9. Kart over Gand Videregående Skoles avdeling i Hoveveien. De røde rektanglene markerer 2. 3. og 4. etasje i hovedbygget (TeleAtlas, 2011)

Oppgaven tar kun for seg 2.-4. etasje i skolens hovedbygg som har adressen Hoveveien 2. Dette er markert i Figur 9. Årsaken til at byggets første etasje ikke implementeres i oppgaven er at denne skiller seg vesentlig ut fra de øvrige etasjene både med hensyn til areal, bruksområde, konstruksjon og byggeår. Første etasje ble bygget i 1961 og består hovedsakelig av store åpne rom som kantine og verksteder. De resterende etasjene ble tilført skolen i 1968 og består av

trapperom og garderober sentrert i midten av bygningskroppen, korridorer rundt dette, og mindre kontorer og klasserom langs byggets fasader. Dette er illustrert i Figur 10. Bygget rommer skolens administrasjon samt klasserom og datarom for elektrofag og helse- og sosialfag. De fleste klassene har mindre enn 15 elever, og klasserommene er derfor relativt små (Gand Videregående Skole, 2011a).



Figur 10. Plantegning over fjerde etasje i hovedbygget ved Gand vgs. Arealbruken er basert på tegning nr. 335.12.53.A1 fra 19. august 1966, og er fremdeles gjeldende. Fasaden til venstre på bildet vender mot nord.

I tillegg til 2.-4. etasje består påbygget fra 1968 av et heisbygg plassert på taket. Dette påbygget har et flateareal på ca 84 m², og rommer heissjakt samt aggregater til ventilasjonsanlegget. Det har ikke vært mulig å komme til påbygget i forbindelse med denne oppgaven, og på grunn av manglende tegningsgrunnlag og dokumentasjon er det valgt å holde heisbygget utenfor oppgaven. Skillet mellom 4. etasje og heisbygget er definert som skillet til annen sone med samme temperatur, slik at varmetap til dette bygget er satt til null. Denne tilnærmingen er også benyttet for etasjeskillet mellom første og andre etasje. Kuldebroen tilhørende dette skillet er likevel beregnet på samme måte som for de andre etasjeskille. Dette er fordi

tegningsgrunnlaget har vært tilstrekkelig, og det har vært mulig å komme til etasjeskillet fra byggets utside ved befaring.



Figur 11. Inngang til hovedbygget ved Gand Videregående Skole.

Utformingen av tilbygget i 1968 ble gjort av arkitektene Eilif Tonning og Lars Øglænd, og vestfasaden kan sees på Figur 11. I dag regnes Tonning og Øglænd som viktige bidragsytere til Sandnes arkitekturhistorie (Sørby og Paavola, 2011). Dette er hovedårsaken til at Rogaland Fylkeskommune har valgt å beholde hovedbygget ved opprustningen av Gand Videregående Skole. I rapporten til forprosjektet kommer det likevel klart frem at bygget per i dag ikke kan tilby et tilfredsstillende læringsmiljø.

Av de eksisterende bygningene har vi valgt å beholde det såkalte hovedbygget – her kalt bygg A. Dette bygget er typisk for sandnesarkitektene Tonning og Øglænd fra 60- og 70-årene. Byggets tilstand tilsier at det må en fullstendig oppgradering av bygget for å oppnå en tilnærming til dagens krav, både teknisk og planmessig (Rogaland Fylkeskommune, 2011, Kapittel 1 - Bok 1, s. 4)

Ved befaring kan det også bekreftes at hovedbygget ved Gand i dag fremstår som trist innvendig. Bygget føles trangt og mørkt med slitte flater, dårlig ventilasjon og betydelig trekk fra vinduene. Oppvarmingen skjer ved innebygde QVB - apparater under vinduene. Dette systemet går ut på at deler av ventilasjonsluften varmes opp i varmevekslere tilknyttet et sentralvarmeanlegg før den blåses opp langs vinduene og ut i rommet. En del av disse systemene er i dag i ustand, hvilket fører til merkbare temperaturforskjeller langs byggets innervegger. Dette er illustrert på Figur 12.



Figur 12. Varmebilde av innvendig vegg i hovedbyggets 4. etasje. QVB - apparatet under vinduet til venstre er i ustand, hvilket fører til en kaldere vegg- og vindusflate. De to punktene markerer en temperaturforskjell på 4,7 °C på de to veggplatene.

Figur 12 viser også hvordan de karakteristiske vertikale ribbene i konstruksjonen er synlige fra byggets innside. Ribbene består av to deler, der den innerste delen er bærende og har et tverrsnitt på 200 x 150 mm. Den ytterste delen er adskilt fra det indre tverrsnittet med 2 cm skumplastisolasjon og strekker seg i et spenn over alle de tre etasjene (Birkeli, 1968). En kommentar til ribbekonstruksjonen var at søylenes bærende tverrsnittsareal var for lite i følge Norsk Standard 427 A del 3 punkt 6.4. Forslaget ble likevel godkjent på grunnlag av dokumentasjon som viser til betongkvalitet og lastberegninger (Reed, 1968). Tabell 7 viser utvalgt informasjon om byggematerialer fra byggesøknaden til Sandnes kommune i 1968.

Tabell 7. Informasjon om materialer fra søknad om byggetillatelse ved Sandnes Yrkesskole (nå Gand Videregående Skole). Mottatt av bygningssjefen i Sandnes 1. februar 1968 (Tonning, 1968).

Informasjon om byggematerialer i hovedbygget på Gand vgs.	
Vegger	Prefabrikkerte betongsøyler, prefabrikkerte brystningsplater. Sandwich-elementer, vinduer med aluminiumsdekning og Thermoglass
Takkonstruksjoner og taktekning	Armert betongdekke, Built-up taktekning. Alle tak er isolert utvendig med 5 cm skumplast
Etasjeskillere	Alle etasjeskillere er utført i armert betong
Særlige konstruksjoner	Bærende konstruksjoner av armert betong

Vinduene i bygget er av merket Glaverbel, og om lag en fjerdedel av dem er mulige å åpne. Som antydnet i Tabell 7 har vinduene aluminiumskarmer og to lag isolerglass. Den detaljerte oppbygningen av vinduskonstruksjonen har ikke vært mulig å finne, men i følge Inger Andresen ved NTNU (2012) er det ut fra teksten på avstandslisten sannsynlig at det er luft mellom glassene. Thermoglass, thermopane eller isolerglass betyr glass uten lavemisjonsbelegg. Samlet gir dette en U-verdi på ca $2,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for glass uten ramme (Andresen, 2012).

3.2 Redegjørelse for innsamling av data

Den beste måten å få oversikt over tilstanden til et bygg på, er å fysisk undersøke bygget. På Gand Videregående Skole ble det derfor utført en termografering, med håp om å avdekke mulige feil og problemområder i fasaden. Termograferingen ble utført 26. januar 2012 i samarbeid med Jorunn Merete Rønnevik som er kurset i Termografering Nivå 1 i regi av ITC (Infrared Training Centre). Kameraet som ble benyttet ved termograferingen var av modellen Fluke Ti25. (FLUKE) Spesifikasjonene til dette kameraet er gitt i Vedlegg B – Spesifikasjoner for Fluke Ti25. (FLUKE)

Vedlegg A – Prøvekrav ved termografering i Skandinavia gir en oversikt over hvilke faktorer som er viktige ved termografering av fasader for et mest mulig pålitelig resultat. Disse kravene er samlet i Tabell 8 sammen med en oversikt over de faktiske forholdene ved termograferingen.

Tabell 8. Sammenligning mellom prøvekrav fra NS-EN 13187:1998 og forholdene på Gand før og under termograferingen

Prøvingskrav fra NS-EN 13187:1998		Klimadata ved Gand før og under termograferingen	Kilde for datainnsamling	OK / ikke OK
24 timer før termografering	Maks ± 10 °C avvik i lufttemperatur ute	Maks avvik på -2,3 °C og +0,2 °C	(Eliassen, 2012)	OK
	Min. differanse i lufttemperatur på 5 °C over klimaskjermen	18 °C inne og 3,3 °C ute. Minste differanse var på 14,7 °C	(Kilen, 2012) (Eliassen, 2012)	OK
	Min. differanse i lufttemperatur på 3/U over klimaskjermen	Laveste U-verdi for vegg på 0,51 gir 3/U = 5,88 Min. differanse på 14,7 °C	Tegningsgrunnlag, se Vedlegg D (Eliassen, 2012)	OK
12 timer før termografering	Ikke direkte sollys på klimaskjermen	Hovedsakelig termografering av nord og øst fasade. Muligens utsatt for sollys om morgenen, men hele dagen var ganske overskyet	Observasjon	Ikke OK
Under termografering	Maks ± 5 °C avvik i lufttemperatur ute	Ikke målt, men stabilt vært tilsier at det er lite sannsynlig med svingning større enn 5 °C	Observasjon	OK
	Maks ± 2 °C avvik i lufttemperatur inne	Fra 18,0 °C til 17,1 °C. avvik på -0,9 °C	Målt med digitalt lufttermometer	OK

Som vist i Tabell 8, er de fleste av prøvekravene oppfylt. Det som ikke er oppfylt, er kravet om at ingen av objektene skal være utsatt for direkte sollys de siste 12 timene før termograferingen. Med mindre termograferingen foretas svært tidlig på morgenen er dette et krav som er vanskelig å imøtekomme. Den aktuelle dagen var det likevel et relativt tungt skydekke, og det antas at de aktuelle fasadene har blitt utsatt for lite direkte sollys. Den solstrålingen som eventuelt har truffet fasaden har vært skiftende og kun i korte perioder, og regnes ikke som avgjørende for resultatet av termograferingen. Prøvingskravene i sin helhet kan derfor regnes som oppfylt. Med en innvendig overflatemotstand R_i på 0,13 (m²K)/W for vegg (NS-EN ISO 6946:2007), og en minste oppløsning for kameraet på 0,2 °C betyr dette at det skal være mulig å oppdage en endring i U-verdi på ca 40 % (NS-EN 13187:1998). Siden dette er en relativt stor endring er det opplagt at resultatene fra termograferingen ikke kan benyttes til å finregne på kuldebroverdier. Bildene kan likevel gi indikasjoner på hvor i bygningen det eksisterer

kuldebroverdier, eller avdekke konstruksjonsdeler som ikke stemmer overens med byggetegningene.

For å øke sannsynligheten for å oppdage kuldebroer og andre uregelmessigheter på varmebildene, ble det produsert et undertrykk i bygningen før termograferingen. Dette ble gjort ved å skru av tilluften fra ventilasjonsanlegget. Deretter ble trykkdifferansen målt ved hjelp av en digital differansetrykkmåler som illustrert på Figur 13. Varmeovnene under vinduene ble også skrudd av for å bedre resultatene, men ikke tidlig nok til at betongveggene rakk å kjøle seg helt ned. Dette vil ha en negativ effekt på resultatet av varmebildene, da varmen i fasaden gjør det vanskeligere å oppdage og bedømme kuldebroer.



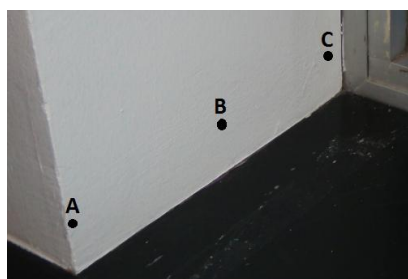
Figur 13. Måling av forskjell i trykk inne og ute. Disse bildene er hentet fra målinger gjort ved termografering hos Stavanger kommune 26. januar 2012. Fremgangsmåte og utstyr er det samme som ved trykkmålinger gjort på Gand vgs. samme dag.

Tabell 9 viser målt klimadata ved Gand vgs. under termograferingen. Det bør spesielt legges merke til at det var relativt mye vind fra sørøst den aktuelle dagen. Dette fører til at fasaden blir mer nedkjølt, og temperaturforskjeller på grunn av variasjoner i bygningskroppen blir visket ut. Det er med andre ord vanskelig å skille ut kuldebroer på varmebilder fra en dag med mye vind.

Tabell 9. Klimadata under termografering

Klimadata under termografering av Gand vgs.	
Utetemperatur	3,1 °C
Innetemperatur	17,1 °C - 18,0 °C
Vindhastighet, normalområde	4,4 m/s - 7,3 m/s
Vindhastighet, enkelte kraftige kast	0,5 m/s - 11 m/s
Trykkdifferanse over klimaskjermen	11 Pa - 109 Pa

For å vurdere påliteligheten av varmekameraet, og den innstilte emissiviteten, ble overflatetemperaturen på ribbene kontrollert med et kontaktermometer i tre ulike punkter. Dette er vist på Figur 14 og i Tabell 10. Som tabellen viser er det opp til 10 % forskjell mellom de to metodene. Denne forskjellen viser at det er viktig å være kritisk til temperaturene fra varmebildene, og huske på at refleksjoner kan ha stor innvirkning på hvordan noe fremstår ved termografering. Emissiviteten på 0,9 er stilt inn for å gi riktigst mulig verdier for de malte betongflatene. Ved analysing av varmebildene er det viktig å huske på at hele bildet er tatt med samme emissivitet, og flater bestående av andre materialer ikke vil bli riktig fremstilt på bildet.



Tabell 10. Differanse mellom innvendige temperaturer målt med varmekamera og kontaktermometer på viste punkter. Emissiviteten er her satt til 0,9.

	Varmekamera	Kontaktermometer	Differanse
Punkt A	12,0 °C	12,0 °C	0,0 %
Punkt B	11,5 °C	10,6 °C	7,8 %
Punkt C	8,0 °C	7,2 °C	10,0 %

Figur 14. Punkt A, B og C. Den aktuelle flaten er innvendig, og en del av ribbekonstruksjonen i det nordøstre hjørnet i et klasserom i 4. etasje.

3.3 Resultater fra termografering

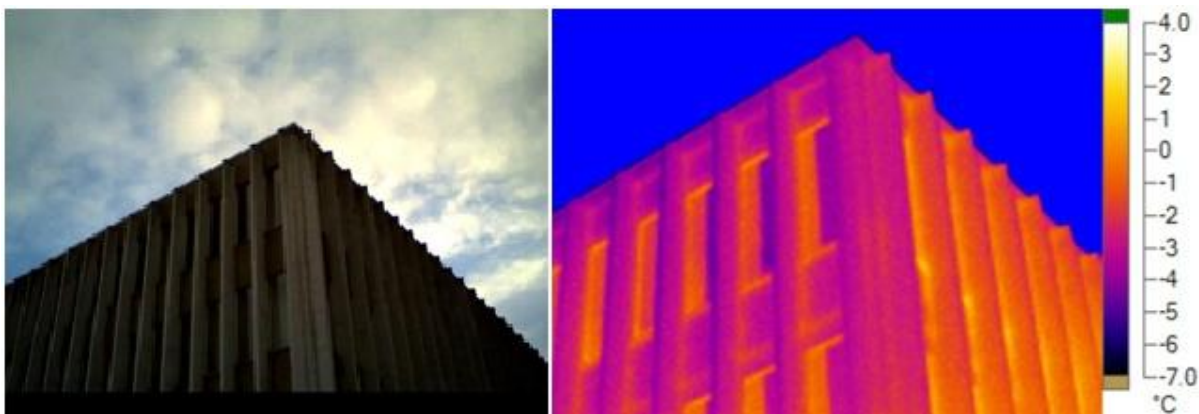
Varmebildene fra termograferingen avdekket enkelte kuldebroer i hovedbygget ved Gand Videregående Skole. Som forventet var det vanskelig å si noe spesifikt om størrelse på kuldebroverdier, men bildene gir likevel en indikasjon på hvor det er endringer i varmetap. Det ble ikke avdekket noen alvorlige konstruksjonsfeil, som for eksempel områder med manglende isolasjon. Bildene bekrefter imidlertid at det generelt er lite isolasjon i bygget som beskrevet på byggetegninger. Dette er med på å øke troverdigheten av at bygget ble oppført slik som det er

beskrevet i tegningsgrunnlaget. På bildene er lufttemperatur samt emissivitet markert i parentes etter bildeteksten.

3.3.1 Fasadebilder

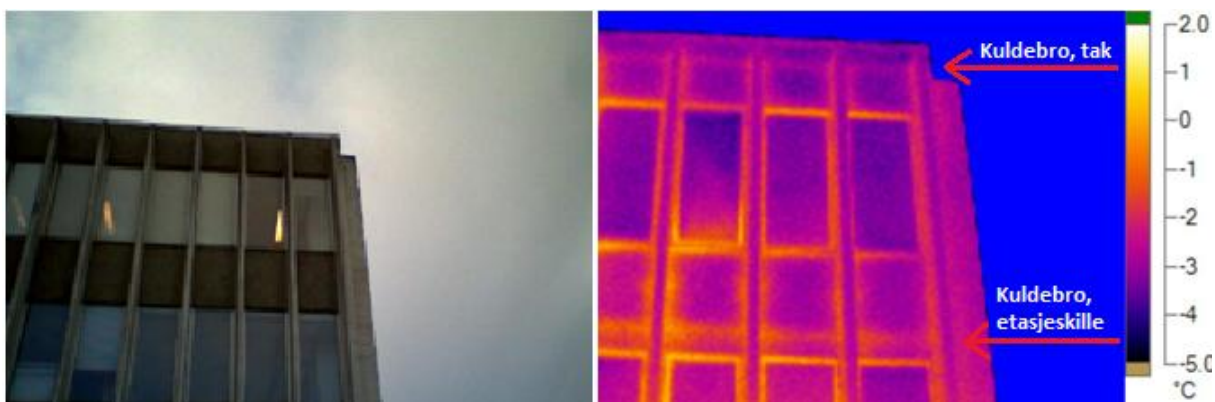
Termograferingen ved Gand videregående skole startet utvendig, og disse bildene gir en fin helhetsoversikt over bygget. Figur 15 viser hjørnet mellom nord- og østfasaden. Himmelen er blokkert fra bildet og er her markert med blått. Dette er gjort for at ikke bredden på temperaturskalaen skal bli for stor, da dette ville ført til mindre tydelige temperaturendringer i detaljene i fasaden. Fasadetemperaturene som vises på bildet ligger mellom -6 °C og 2 °C , og de ulike temperaturene er markert med skalaen på varmebildets høyre side. Det er verdt å merke seg at disse temperaturene åpenbart er fullstendig misvisende. Bygget holder en innvendig temperatur på ca 18 °C , og lufttemperaturen ligger på $3,1\text{ °C}$. Da er det komplett umulig at store deler av fasaden ligger på minussiden av temperaturskalaen. Denne åpenbare feilkilden kan forklares med feil innstilt bakgrunnstemperatur, samt at kameraet ikke kompenserer for avstanden til objektet. Den temperaturen som i virkeligheten skal legges inn som bakgrunnstemperatur er ikke lufttemperaturen, men strålingen fra omgivelsene. Ved termografering av en stor fasade ute vil denne bakgrunnsstrålingen være vanskelig å måle på grunn av mange påvirkende elementer i uterommet, og det er ikke gjort noe forsøk på dette i forbindelse med denne oppgaven. Stråling fra himmelen vil også føre til en tilsynelatende lavere temperatur enn den reelle overflatetemperaturen. Ved termografering av bygninger er det derfor først og fremst temperturmønster i bildet som er av interesse, og i liten grad de spesifikke temperaturene. Til eksempel vises det til en kommentar fra Karl Grimnes, daglig leder for Termografi og Måleteknikk AS, gitt i en personlig e-post. Han sier at det har vært gjort forsøk på å finne U-verdier på bakgrunn av tilsynelatende overflatetemperaturer ved termografering. I laboratorium med kontrollerte omgivelser er det mulig å regne seg frem til en noenlunde nøyaktig verdi, men i felten er dette tilnærmet umulig. Ved kontinuerlig måling av temperaturer over flere døgn samt kameraer på begge sider av veggene har det kun vært mulig å oppnå en målenøyaktighet på rundt $\pm 160\%$ (Grimnes, 2012, Personlig e-post). Konklusjonen av dette er at det, spesielt for utvendige bilder, må sees bort i fra de tilsynelatende temperaturene og heller legges vekt på nyansemønster i fasadene. Det er likevel valgt å ta med tilsynelatende temperaturskala for å illustrere hvilke farger som indikerer varmere eller kaldere temperaturområder samt bredden på skalaen i bildet.

På Figur 15 fremstår nordfasaden, til høyre i bildet, som betydelig varmere enn østfasaden. Dette er identisk for alle varmebildene som viser begge fasadene, og kan forklares med mindre vind på den siden av bygget. Dette er fornuftig med tanke på at det blåste ganske kraftig fra sørøst den aktuelle dagen, og dette vil kjøle ned fasaden.



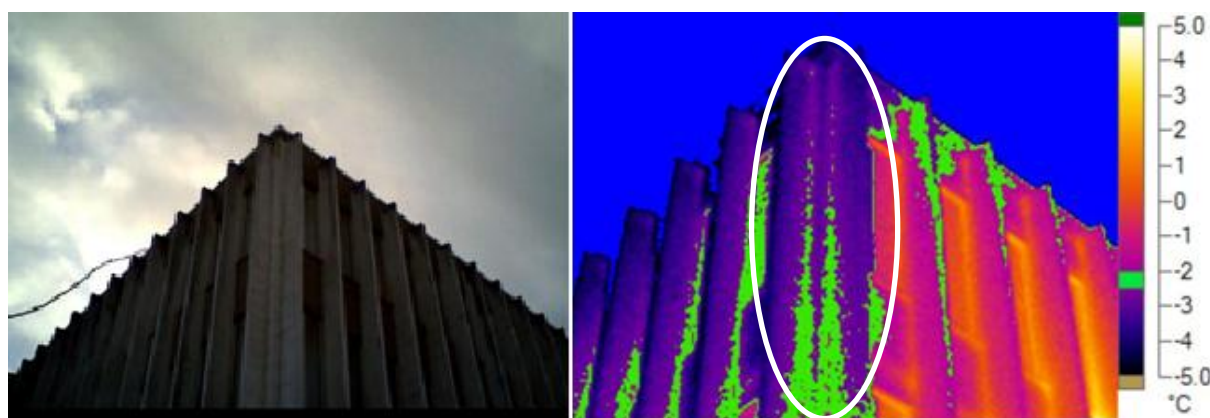
Figur 15. Hjørne mellom nord- og østfasade. ($T=3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\epsilon=0,9$)

I tillegg til at nordfasaden er varmere enn østfasaden, indikerer Figur 15 et tydelig økt varmetap rundt vinduene i bygget. Dette er fornuftig med tanke på at karmene er laget av aluminium som har en høyere varmeledningsevne enn de øvrige materialene. Likevel er det viktig å huske på at den innstilte emissiviteten ikke gjelder for dette materialet, og at bildet også på dette området må tas med en klype salt. Det bildet kan si noe fornuftig om er imidlertid et ekstra varmetap ved etasjeskillet mellom tredje og fjerde etasje samt overgang til tak. Dette er ytterligere illustrert i Figur 16 der de horisontale kuldebroene er markert med piler.



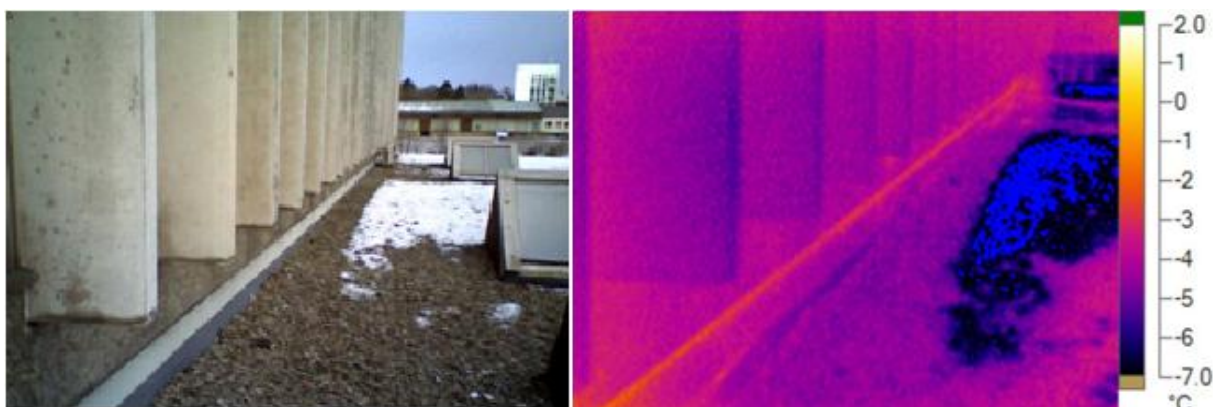
Figur 16. Østfasade med markerte kuldebroer fra etasjeskille og tak. ($T=3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\epsilon=0,9$)

Ved å studere de vertikale linjene på Figur 16 er det også mulig å se kuldebroer langs begge sider av ribbene. Disse strekker seg både gjennom betongkonstruksjonen, og mellom vinduene. Der to ribber møtes i et hjørne er det også en ekstra kuldebro. Dette er illustrert på Figur 17 der temperaturområdet mellom $-2,0\text{ °C}$ og $-2,5\text{ °C}$ er markert med grønt for å fremheve kuldebroen i bildets midtparti.



Figur 17. Geometrisk vertikal kuldebro i hjørnet av bygget ($T=3,1\text{ °C}$, $\epsilon=0,9$). Kuldebroen er ringet inn og det aktuelle temperaturområdet er markert med grønn kontrastfarge.

I tillegg til kuldebroene forårsaket av etasjeskiller mellom andre, tredje og fjerde etasje, er det registrert en horisontal kuldebro mellom første og andre etasje. Denne kuldebroen skiller seg ut fra de øvrige fordi konstruksjonen her er annerledes. Ved etasjeskillene lenger opp i bygget er konstruksjonen identisk over og under etasjeskillet, mens etasjeskillet mellom første og andre etasje tydelig indikerer overgangen mellom to ulike veggkonstruksjoner. Bildene vist i Figur 18 og Figur 19 er tatt fra taket over første etasje på byggets nordside, men overgangen som ser ut som en horisontal hvit linje, fortsetter også på øst- og vestsiden av bygget der den plane veggflaten går helt ned til bakken. Den hvite kanten på bildet til venstre, viser at overflatematerialet ved denne kuldebroen skiller seg fra de øvrige materialene og dermed ikke har samme emissivitet. Ved nærmere ettersyn ser det likevel ut som om det kun er den øverste delen av denne kanten, som har en temperatur som er markant høyere enn resten av vegg. Dette er markert i Figur 19 som viser at den tydelige linjen på varmebildene skyldes en reell temperaturendring og ikke kun en annen emissivitet enn resten av bildet.



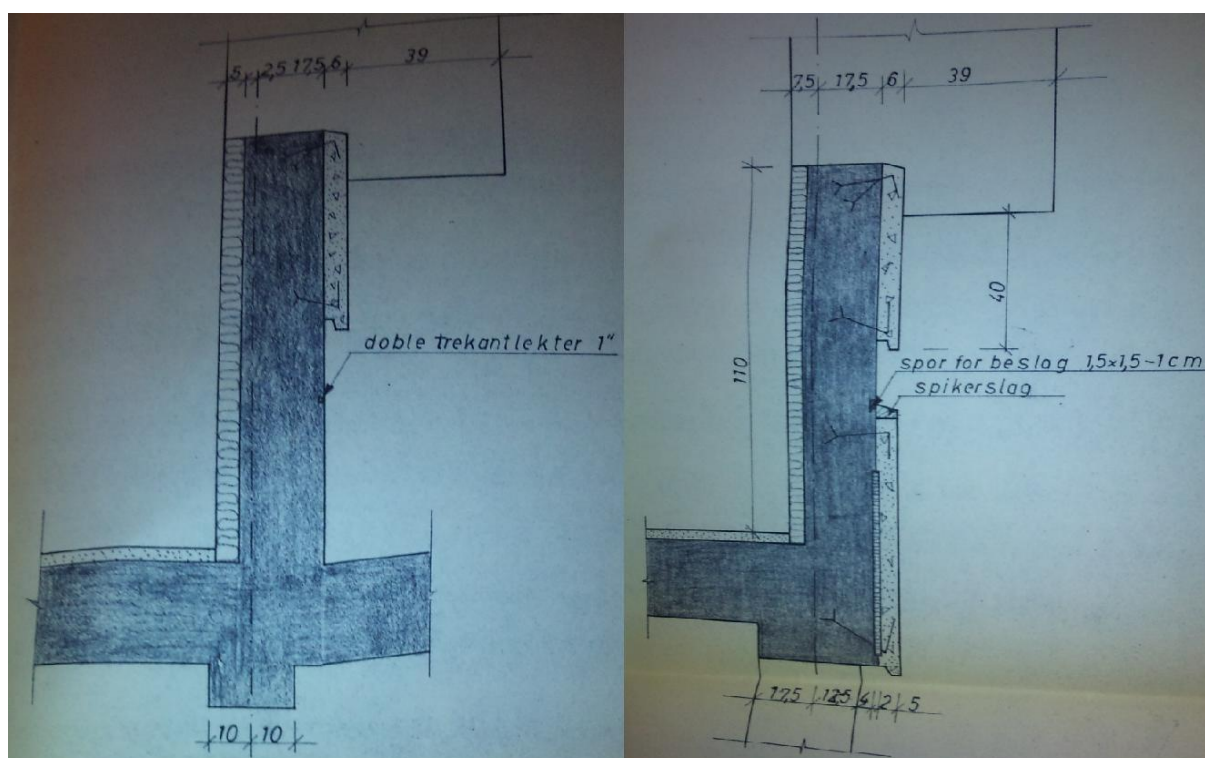
Figur 18. Kuldebro under brystningsplatene i andre etasje. ($T=3,1$ °C, $\epsilon=0,9$)



Figur 19. Kuldebro under brystningsplatene i andre etasje ($T=3,1$ °C, $\epsilon=0,9$). Bildet viser gradvis overgang mellom infrarødt og synlig lys. Det er her klart at det kun er den øverste delen av den hvite linjen som har en markant høyere temperatur.

Ved sammenligning av varmebildene mot byggetegninger viser det seg at den hvite kanten på bildet ikke markerer et etasjeskille. Det faktiske etasjeskillet er plassert ca 60 cm under slutten på brystningsplatene som vist i Figur 20. På byggets nord- og sørside vil dette etasjeskillet gjemmes bort av utvendig takisolasjon og grus, og bidra minimalt som kuldebro. På byggets øst- og vestsida vil det imidlertid være en kuldebro forårsaket av dette etasjeskillet. Dette er vist til

høyre i Figur 20 der den gjennomgående betongkonstruksjonen er utvendig isolert med 2 cm skumplast under brystningsplatene. Byggetegningene forklarer ikke den økte temperaturen i øvre del av den hvite linjen som vist i Figur 18 og Figur 19.



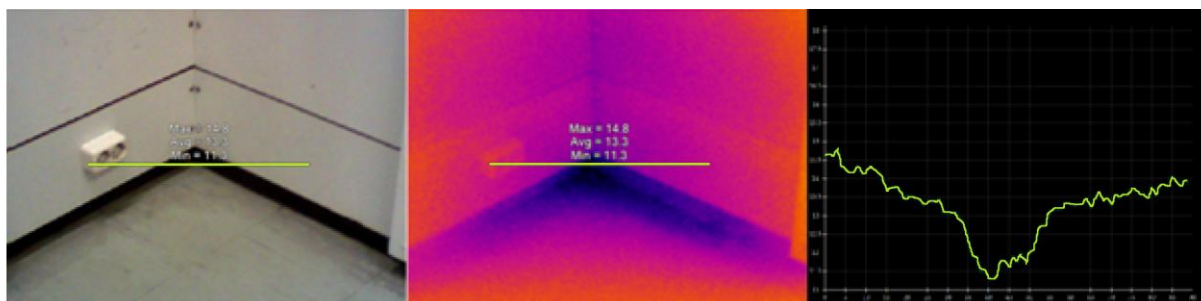
Figur 20. Utdrag fra tegningsnummer 256.06. Datert 12. februar 1969, og signert Ottar Birkeli, rådgivende ingeniør, bygg. Tegningen til venstre viser et tverrsnitt av etasjeskillet mellom første og andre etasje, samt fortsettelsen til tak over første etasje. Tegningen til høyre viser et tverrsnitt av etasjeskillet mellom første og andre etasje på byggets øst og vestfasade.

3.3.2 Innvendige bilder

Selv om de utvendige varmebildene er gode for å skape et oversiktsbilde over kuldebroer og mulige problemområder i bygget, er innvendige bilder mer nøyaktige når det kommer til tilsynelatende temperaturer. Dette kommer av at det er mye lettere å ha kontroll over hvilke strålingskilder som kan påvirke bildene i et rom innvendig kontra utvendig. Innendørs bilder blir også automatisk mer detaljerte, da plassmangel tvinger termograføren nærmere objektet. Alle innvendige varmebilder til denne oppgaven ble tatt i et klasserom i nordøstre hjørne av fjerde etasje. Årsaken til at alle bildene ble tatt i samme rom, var at temperaturen i klasserommet måtte skrues av så tidlig som mulig før bildene ble tatt, og dette var vanskelig å få til når bygningen var i bruk. Det aktuelle klasserommet representerer likevel bygget på en god

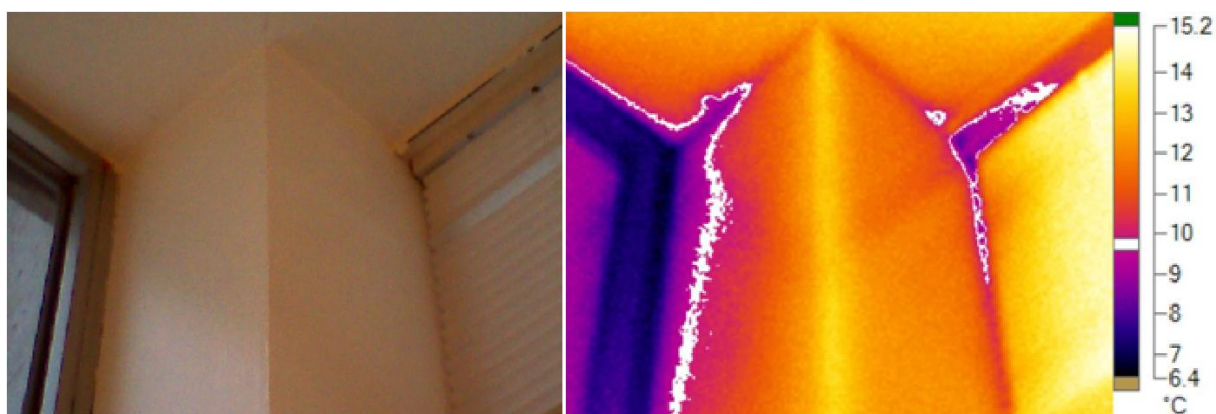
måte siden det var et hjørnerom med stort flateareal mot friluft, og aktuelle bygningsdetaljer var godt synlige fra innsiden.

De tre bildene i Figur 21 viser den målte temperaturredifferansen i klasserommets nordøstre hjørne. Temperaturene på overflaten går fra 15,1 °C på veggflaten i bildets ytterkant til 11,1 °C helt innerst i hjørnet. Grafen til høyre markerer svingningen i temperatur over den grønne horisontale linjen tegnet på bildet og varierer mellom 14,8 °C og 11,3 °C. Det er naturlig at temperaturen i hjørnet er lavere enn på resten av flatene da luften sirkulerer mindre her enn på overflaten av en plan vegg. Dette betyr at temperaturendringen ikke nødvendigvis skyldes kuldebroer, men kan være forårsaket av at luften som blir kjølt ned på overflaten blir liggende i hjørnet fremfor å skiftes ut som i resten av rommet. Dette betyr sannsynligvis at flaten ikke blir varmet opp av stadig ny varm luft, men holder seg kjølig med et beskyttende kaldt luftlag på overflaten. Det er også viktig å huske på at denne flaten ikke står rett mot sandwichelementene eller ribbene i fasaden, men er bygget ut med plater for å lage rom til rør og varmesystem på baksiden. Det er derfor tvilsomt at temperaturendringen på bildet, som ser dramatisk ut ved første øyekast, i virkeligheten utgjør noe stort problem.



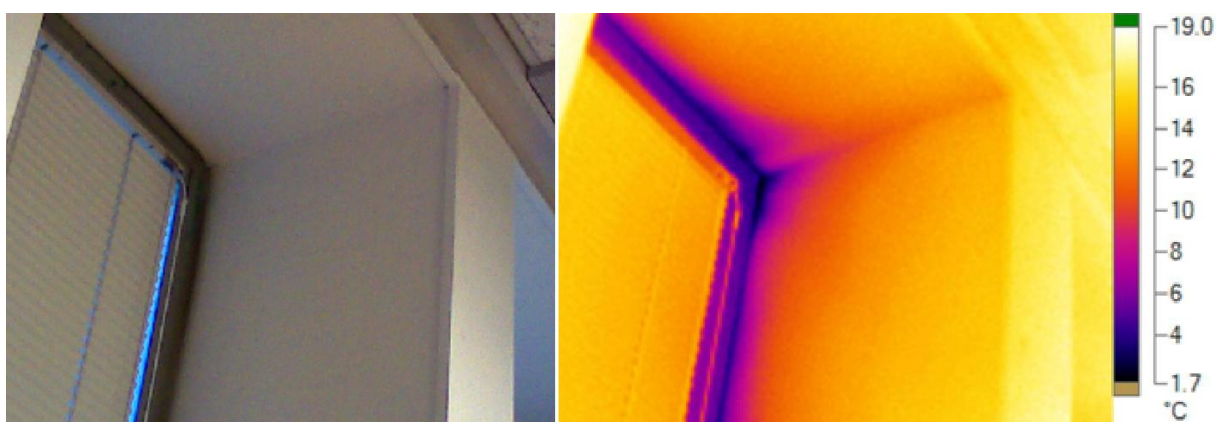
Figur 21. Gulvflate i nordøstre hjørne ($T=18,0$ °C, $\epsilon=0,9$). Grafen til høyre viser temperaturvariasjoner over den grønne linjen som er tegnet på bildene til venstre. Temperaturgrafene svinger fra 11,3 °C til 14,8 °C.

Lengre opp i rommets hjørne avsluttes brystningsplatene som rommer varmeanlegget, og hjørneribbene blir mer fremtredende fra rommets innside. Dette er illustrert i Figur 22 som viser overgangen mellom hjørneribber og himling.



Figur 22. Ribbekonstruksjon i nordøstre hjørne ($T=18,0\text{ °C}$, $\epsilon=0,9$). Temperaturområdet fra $9,6\text{ °C}$ til $9,9\text{ °C}$ er markert med en hvit isoterm.

Ved gransking av Figur 22 er det viktig å huske på at det i forbindelse med termograferingen ble skapt et undertrykk i bygget. Dette ble gjort for å forsterke kuldebroer og infiltrasjon, hvilket kan sees på dette bildet. De mørke områdene som er rammet inn av isotermene på bildet, antyder en lekkasje der kald luft siger inn rundt vinduskarmen og i overgangen mot himling. At de mørke områdene skyldes infiltrasjon, kan sees av den flammeliknende formen som står vinkelrett på den aktuelle kanten. Luftlekkasje rundt vindu kan også sees på Figur 23. Det som er påfallende på både Figur 22 og Figur 23, er vinduskarmene som fremstår som veldig kalde. Disse er av aluminium, med en lavere emissivitet, og kan ikke måles ut fra temperaturskalaen på høyre side av bildet. Fra befaring kan det likevel bekreftes at de holder en mye lavere temperatur enn den omkringliggende vegg, hvilket også er en årsak til at vegg og ribbe er kaldere langs karmene.



Figur 23. Infiltrasjon rundt vindu på nordfasade ($T=18,0\text{ °C}$, $\epsilon=0,9$).

Samlet gir de innvendige varmebildene indikasjoner på store temperaturdifferanser på overflatematerialene i klasserommet. Dette kan bekreftes ved befaring da spesielt infiltrasjonen i bygget var merkbar.

3.3.3 Oppsummering

Det er ikke mulig å finne eksakte kuldebroverdier ut i fra termograferingen gjort på Gand Videregående Skole. Det er likevel mulig å si noe om hvor det er registrert endringer i varmetap og gjøre et anslag på hvor stor den tilhørende kuldebroverdien er. Dette anslaget er vist i Tabell 11 som også gir retningen på de lineære kuldebroene. Dette er tatt med for å gi et bedre inntrykk av hvilke kuldebroer det er snakk om.

Tabell 11. Antatt størrelse på kuldebroer i bygget basert på erfaringer fra termografering

Registrerte kuldebroer	Lengderetning	Antatt kuldebroverdi
Etasjeskille mellom 1. og 2. etasje	Horisontal	Liten
Kant over etasjeskille mellom 1. og 2. etasje	Horisontal	Stor
Etasjeskille mellom 2. og 3. etasje	Horisontal	Liten
Etasjeskille mellom 3. og 4. etasje	Horisontal	Liten
Overgang til tak	Horisontal	Middels
Begge sider av ribber 2.-4. et.	Vertikal	Middels
Hjørner 2.-4. et.	Vertikal	Stor
Overgang mellom vinduskarm og vegg	Horisontal	Stor
Overgang mellom vinduskarm og ribbe	Vertikal	Stor
Overgang mellom inngangsdør og vegg	Horisontal	Stor
Overgang mellom inngangsdør og ribbe	Vertikal	Stor

En samling av brukbare varmebilder som ble produsert ved termograferingen på Gand Videregående Skole, er gitt i Vedlegg C – Varmebilder fra Gand Videregående Skole 26. januar 2012.

3.4 Presentasjon av resultater fra beregninger i Therm

Ved beregninger i Therm er hovedsaklig byggetegningene fra 1968 lagt til grunn. Relevante byggesøknader og vedlagte dimensjoneringsberegninger har også blitt benyttet der disse har gitt utfyllende informasjon. Dokumentene har blitt hentet fra arkivet til Sandnes kommune og studert der. Det har ikke vært mulig å låne med seg tegninger eller annen dokumentasjon fra kommunehuset, men siden det var mulig å kopiere bilder og store tegninger hos kommunen, har det vært mulig å benytte informasjonen ved arbeidet med denne oppgaven. Der det har manglet

opplysninger i tegningsgrunnlaget, har det vært nødvendig å gjøre antagelser basert på byggeår, konstruksjonstype og erfaringer fra mennesker jeg har vært i kontakt med.

For alle beregninger er det benyttet en temperaturdifferanse på 20 °C mellom inne og uteluft. I Therm er det også lagt inn en "film koeffisient" for alle overflater mot luft. Denne koeffisienten er det samme som en delt på varmeovergangsmotstanden R_{si} og R_{se} , som er gitt av Norsk Standard (NS-EN ISO 6946:2007). "Si" og "Se" refererer henholdsvis til "surface, internal" og "surface, external", og de aktuelle verdiene er gitt av Tabell 12. Film-koeffisienten sier noe om varmetapet i overgangen mellom luft og materiale da luften helt inntil en overflate er mer stillestående enn i resten av rommet. De overflatene på tegningen som ikke er reelle, men som kommer av at det kun tegnes et utsnitt av den aktuelle veggen, får adiabatiske randbetingelser. Dette vil si at energi ikke krysser overflaten, og ved stasjonære forhold vil den effekten som krysser veggens innside også måtte krysse veggens utside. Hvilke konduktiviteter som er benyttet for de ulike materialene, kan sees i Vedlegg D - U-verdier.

Tabell 12. Filmkoeffisienter brukt i beregningene i Therm

Innvendige flater	R_{si}		Film koeffisient	
Horisontal varmegjennomgang (vegger)	0,13	(m ² K)/W	7,69	W/(m ² K)
Vertikal varmegjennomgang (tak)	0,10	(m ² K)/W	10,00	W/(m ² K)
Utvendige flater	R_{se}		Film koeffisient	
Horisontal varmegjennomgang (vegger)	0,04	(m ² K)/W	25,00	W/(m ² K)
Vertikal varmegjennomgang (tak)	0,04	(m ² K)/W	25,00	W/(m ² K)

For simulering av effekttap i forbindelse med overgangen mellom ribbe og vegg, er hele tverrsnittet av ribben tegnet med en meter vegg på hver side. Dette gir en kuldebroverdi for ribben som kombineres med en U-verdi for sandwichelementene til veggen. Hele figurens bredde regnes som bredde på vegg, og den reduserte U-verdien til ribben tas altså ikke med, men uttrykkes i kuldebroverdien. Alternativt hadde det vært mulig å regne begge sidene på ribben hver for seg for så å kombinere de to kuldebroverdiene med U-verdien til sandwichelementene og U-verdien til ribben. Denne beregningsmetoden gir et høyere totalt varmetap som antas å være mindre reelt. Årsaken til dette er at det bør beregnes minst 1 meter homogen flate på hver side av den aktuelle detaljen for at de kalkulerte verdiene skal være troverdige (Rønnevik, 2012, personlig samtale). Dette gjør at ribbene ved denne beregningsmetoden simuleres som bredere enn hva de er i virkeligheten, og U-verdien til disse

blir betydelig. I praksis vil forholdsvis lite energi gå gjennom ribbenes ytterste flate, men heller ta korteste vei og forlate vegg langs ribbens sideflater.

Ved beregning av overgang mellom ribber og vinduskonstruksjon, er imidlertid metoden med en meter vindu og en meter ribbe benyttet. Det var ønskelig å benytte samme metode som for overgang mellom ribbe og vegg, men sammensetningen mellom glassflate, aluminiumskarm og ribbe gjorde modellen svært detaljert. Dette førte til at Therm ikke var i stand til å foreta en tilfredsstillende elementinndeling, og simuleringen ble mangelfull. En oversikt over alle tverrsnitt med tilhørende temperaturfordeling og varmegjennomgang i form av flukstetthet, kan sees i Vedlegg G – Detaljer modellert i Therm.

Som nevnt i Kapittel 3.1 foreligger det ingen faktaopplysninger om vinduskonstruksjonen ved Gand Videregående Skole i original byggdokumentasjon. Det er antatt en U-verdi på 2,8 W/(m²K) for glasset, og en noe høyere U-verdi for aluminiumsrammen. Modellene som er benyttet ved beregning av kuldebroverdier i Therm og Window, har derfor blitt designet for å passe disse verdiene samt vinduenes dimensjon. Det er med andre ord ikke grunnlag for å påstå at tverrsnittet av rammen ser ut nøyaktig som modellene benyttet i denne oppgaven, men det samlede varmetapet antas å ligge i riktig størrelsesområde. Vindusflaten som er benyttet i beregningene, består av to lag glass uten lavemisjonsbelegg. Glassene har en tykkelse på 3,1 mm hver og er modellert og beregnet i Window. Mellom glassene er det lagt inn en luftlomme på 9,8 mm. Samlet gir dette en U-verdi på 2,83 W/(m²K). Karm og spacer er tegnet i Therm og importert til Window for beregning av samlet U-verdi for vinduet. Vinduskonstruksjonen med størrelse 205 x 80 cm får da en U-verdi på 2,9 W/(m²K) inkludert glass, spacer og aluminiumsramme. Deretter er konstruksjonen importert tilbake til Therm for beregning av kuldebroverdier ved overganger til vegg og ribbe.

Som det kan sees av Vedlegg E – Kuldebroverdier samt Tabell 13, varierer de beregnede kuldebroverdiene i bygget fra 0,01 – 1,36 W/(mK). Den laveste av disse verdiene hører til kant over etasjeskille i 2. etasje. Dette var den hvite kanten som var synlig som et tydelig økt varmetap på varmebildene. Den lave kuldebroverdien ved beregning viser at tilgjengelige tegninger av veggens tverrsnitt sannsynligvis ikke stemmer helt med virkeligheten i dette tilfellet. De to høyeste kuldebroverdiene hører til overgang mellom tak og ribber samt overgang mellom etasjeskiller og ribber. I disse overgangene er det svært lite isolasjon og det virker derfor sannsynlig at de tilhørende kuldebroverdiene også er høye. Varmen vil likevel ikke

bevege seg gjennom ribbene på samme måte som de beregnede modellene viser. Dette har samme årsak som at U-verdien for ribben ikke er benyttet i andre tilfeller, men heller slått sammen med kuldebroverdien. Siden Therm ikke er et tredimensjonalt program er det imidlertid ikke mulig å regne nøyaktig på den samlede kombinasjonen av vegg, ribbe og etasjeskille. Dette kan gjøres ved hjelp av andre programmer som for eksempel Ansys, men det vil ikke bli lagt vekt på i denne oppgaven.

Tabell 13. Kuldebroverdier med høyeste og laveste verdi basert på feilmargin i Therm

Kuldebroer	Beregnet kuldebroverdi, Ψ	Størrelsesområde basert på feilmargin oppgitt av Therm
Etasjeskille – Vegg, 3. og 4. et.	0,26 W/(mK)	0,23 – 0,28 W/(mK)
Etasjeskille – Ribbe, 3. og 4. et.	1,36 W/(mK)	1,28 – 1,43 W/(mK)
Etasjeskille, 2. et.	0,11 W/(mK)	0,06 – 0,15 W/(mK)
Kant over etasjeskille i 2. et.	0,01 W/(mK)	0,01 – 0,01 W/(mK)
Tak – Vegg	0,41 W/(mK)	0,38 – 0,43 W/(mK)
Tak – Ribbe	1,20 W/(mK)	1,16 – 1,24 W/(mK)
Ribbe – Vegg (hele ribben)	0,43 W/(mK)	0,40 – 0,46 W/(mK)
Enden på ribbene, 2. et.	0,45 W/(mK)	0,41 – 0,49 W/(mK)
Hjørner, 2. et.	0,05 W/(mK)	0,04 – 0,05 W/(mK)
Hjørner, 3. og 4. et.	1,03 W/(mK)	0,98 – 1,09 W/(mK)
Vegg – Nedre kant av vindu	0,51 W/(mK)	0,42 – 0,60 W/(mK)
Vegg – Øvre kant av vindu	0,24 W/(mK)	0,17 – 0,31 W/(mK)
Vindu – Ribbe (en side)	0,10 W/(mK)	-0,04 – 0,25 W/(mK)

Ved å gange opp de beregnede kuldebroverdiene og U-verdiene med sine respektive lengder og arealer er det mulig å få en oversikt over deres innvirkning på den samlede varmetapssituasjonen i bygget. Dette er vist i Vedlegg F – Oversikt over dimensjoner med tilhørende effekttap ved $\Delta T=20$ °C. Temperaturforskjellen på 20 °C mellom inne- og uteluft er også brukt ved simuleringene i Therm, og Vedlegg G og F er dermed direkte sammenlignbare. For å gi et oversiktsbilde over hvor mye disse tallene representerer i årlig energitap, er det kreert en modell av 2., 3. og 4. etasje av hovedbygget ved Gand videregående skole i Simien. Dette er et simuleringsprogram som dynamisk beregner bygningers energibruk, effektbehov og innneklima. For Simienmodellen er det benyttet U-verdier og normalisert kuldebroverdi fra Vedlegg F, og klimasted er satt til Stavanger. For å gjøre det mulig å bare se på effekttap gjennom bygningskallet, er ventilasjon og internlaster tatt ut av modellen, og alle virkningsgrader er satt til 1. Infiltrasjon i bygget er også tatt ut av modellen. Dette utgjør en stor feilkilde sett i forhold til byggets reelle situasjon, men er mer hensiktsmessig i forhold til det som er relevant i denne

oppgaven. Utvalgte resultater fra denne simuleringen er vist i Vedlegg H – Energibudsjett og varmetapstall. De tre beregningene i vedlegget er basert på summen av kuldebroberegningene fra Therm samt minimums- og maksimumsverdier som kommer av feilmarginene til hver enkelt kuldebro. Samlet gir disse et bilde på den beregnede situasjonen, samt et slags ”best case” og ”worst case” scenario. Som kakediagrammene i Vedlegg H viser, utgjør varmetap gjennom dører og vinduer den desidert største varmetapsposten. Dette er ikke overraskende tatt i betraktning den høye U-verdien og det totale flatearealet som disse utgjør. Kuldebroer er også en betydelig kilde til varmetap med en prosentandel på mellom 15,7 og 28,9 av det totale varmetapstallet for bygningsdelen. En samlet oversikt over kuldebroverdier, effekttap ved 20 °C temperaturdifferanse og årlig energitransport er gitt i Tabell 14.

Tabell 14. Nøkkeltall for blokken. Basert på tegninger samt beregninger i Therm og Simien. Effekttap er beregnet ved $\Delta T = 20$ °C.

	Beregnet	Min.	Maks.
BRA (m ²)	3 191		
Samlet kuldebroverdi (W/K)	854	541	1 168
Normalisert kuldebroverdi (W/(m ² K))	0,27	0,17	0,37
Effekttap - fasade og tak (kW)	56,1		
Effekttap - kuldebroer (kW)	17,1	10,8	23,4
Totalt effekttap (kW)	73,2	66,9	79,5
Oppvarmingsbehov - fasade og tak (MWh/år)	245,87		
Oppvarmingsbehov - kuldebroer (MWh/år)	72,62	46,26	98,18
Totalt oppvarmingsbehov (MWh/år)	318,49	292,13	344,05
Kjølebebehov - fasade og tak (MWh/år)	2,06		
Kjølebebehov - kuldebroer (MWh/år)	0,61	1,18	0,17
Totalt kjølebebehov (MWh/år)	2,67	3,24	2,23
Tot. årlig energimengde inn/ut – fasade/tak (MWh/år)	247,93		
Tot. årlig energimengde inn/ut – kuldebroer (MWh/år)	73,23	47,44	98,35
Total årlig energimengde inn/ut (MWh/år)	321,16	295,37	346,28

Som Tabell 14 viser, utgjør kuldebroer en betydelig del av varmetapet til bygget. Tabellen viser høye verdier som krever nærmere forklaring. En årsak til de høye verdiene ligger i definisjonen av kuldebroer for denne oppgaven. Vanligvis ville varmetap forårsaket av ribber, samt overgangen mellom ribber og vegg, vært implementert i den totale U-verdien til vegg. Siden denne oppgaven handler om kuldebroer er det likevel valgt å betrakte disse overgangene som nettopp dette. Ved ikke å betrakte ribbene som kuldebroer ville det vært mulig å flytte om lag 87 (W/K) av den samlede kuldebroverdier over til kategorien for varmetap gjennom fasade og tak.

Dette ville endret den normaliserte kuldebroverdien til $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Til sammenligning minnes det om at Norsk Standard anbefaler å sette normalisert kuldebroverdi til $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for nye bygninger i betong, mur eller stål med 5 cm kuldebrobryter i fasadene og 20 cm isolasjon i yttervegger. Siden dette er et bygg fra 1968, virker det logisk at verdiene ligger et godt stykke over det nivået vi kan forvente fra en bygning bygget etter dagens krav.

Som det også kan sees av Tabell 14, utgjør de estimerte feilmarginene en betydelig usikkerhet i de endelige resultatene. Differansen mellom den beregnede verdien og min./maks. verdiene er på drøye 60 %. For årlig oppvarmingsbehov forårsaket av kuldebroer, tilsvarer forskjellen mellom laveste og høyeste verdi om lag 50 MWh. Uten å ta hensyn til virkningsgrader for oppvarmingssystemet, og ved å anta en elektrisitetspris på 80 øre/kWh utgjør denne forskjellen 40 000 kr årlig. Ved å sammenligne verdien med energiinnholdet i råolje tilsvarer 50 MWh et volum på omlag 4,3 tonn (EnergiLink).

4 Vurdering av data og forslag til forbedringer

4.1 Kulderoer og deres påvirkning av etterisolering

Som vist i Kapittel 3, står kuldebroer for en betydelig del av varmetapet fra Hovedbygget ved Gand Videregående Skole. En del av denne store andelen er riktignok en direkte årsak av beregningsmetoden, og kunne ha vært plassert under varmetap fra tak og fasader. Likevel blir den normaliserte kuldebroverdier langt høyere enn anbefalte verdier for normaliserte kuldebroverdier fra NS 3031:2010. Disse normtallene er hovedsakelig beregnet for nye bygg, men kan også benyttes for eldre bygg dersom ikke annen informasjon er tilgjengelig. Det er praksis å benytte normtall ved for eksempel energimerking av gamle bygg, noe som har blitt svært aktuelt de siste årene.

Et problemområde som kommer frem av varmebildene, men ikke forklares av beregningene, er den hvite kanten over etasjeskillet mellom 1. og 2. etasje. Den lineære kuldebroverdier for denne detaljen er antatt å være stor på bakgrunn av termograferingen, men beregnes til å være liten ut i fra byggetegninger. Det er sannsynlig at byggearbeidet rundt dette snittet ikke er utført i henhold til tegninger, og at det i praksis er mindre isolasjon her enn hva som var planlagt. De andre antakelsene som ble gjort med hensyn til størrelsen på kuldebroverdi er vist i Tabell 15. Tabellen viser en del forskjeller mellom de to metodene, spesielt med hensyn til kuldebroer rundt dører og vinduskonstruksjoner. En årsak til dette kan være vanskeligheter med å tolke kuldebroene på varmebildene på grunn av lavere emissivitet på glass og ramme. En annen årsak kan være at det har blitt gjort feil antakelser med hensyn til innfestingen av vinduskonstruksjonen ved beregning i Therm. Kuldebroer ved etasjeskillene viste seg generelt å være mindre ved termograferingen enn de beregnede verdiene viser. En årsak til dette kan være vind som kjøler ned fasaden og visker ut temperaturendringene på varmebildet. En generell observasjon fra termograferingen er at temperaturforandringene som indikeres av varmebildene, er svært lett påvirkelige av andre faktorer, og dermed er vanskelige å sette verdier på. Min egen manglende erfaring med termografering gjør dette usikkerhetsmomentet ytterligere forstreket. Med unntak av kanten over etasjeskillet mellom 1. og 2. etasje, betraktes derfor de beregnede kuldebroverdiene som mest pålitelige.

Tabell 15. Sammenligning av resultater fra termografering og beregning. Ved ulike kuldebroverdier er verdien som står i parentes en gjennomsnittsverdi

Registrerte kuldebroer	Lengderetning	Anslag av størrelse etter termografering	Kuldebroverdi beregnet i Therm
Etasjeskille mellom 1. og 2. etasje	Horisontal	Liten	Liten (0,11)
Kant over etasjeskille mellom 1. og 2. etasje	Horisontal	Stor	Liten (0,01)
Etasjeskille mellom 2. og 3. etasje	Horisontal	Liten	Middels (0,26)
Etasjeskille mellom 3. og 4. etasje	Horisontal	Liten	Middels (0,26)
Overgang til tak	Horisontal	Middels	Stor (0,61)
Begge sider av ribber 2.-4. et.	Vertikal	Middels	Middels (0,43)
Hjørner 2.-4. et.	Vertikal	Stor	Stor (0,94)
Overgang mellom vinduskarm og vegg	Horisontal	Stor	Middels (0,37)
Overgang mellom vinduskarm og ribbe	Vertikal	Stor	Liten (0,10)
Overgang mellom inngangsdør og vegg	Horisontal	Stor	Middels (0,24)
Overgang mellom inngangsdør og ribbe	Vertikal	Stor	Liten (0,10)

Med utgangspunkt i at det i dag er planlagt en omfattende rehabilitering for Gand Videregående Skole, ansees det som uaktuelt at hovedbygget blir stående i sin nåværende forfatning. De resterende byggene på skolens område skal rives, og nye bygg skal etableres i henhold til dagens krav. I forprosjektet har Rogaland Fylkeskommune uttrykt et ønske om å beholde hovedbygget, og det er dette forprosjektet som legges til grunn for ytterligere forslag til forbedringer i denne oppgaven. I forbindelse med forprosjektets energiberegninger for de nye skolebyggene, har Inger Andresen fra LINK Arkitektur tatt utgangspunkt i en del forbedringer av bygningskroppen ved hovedbygget. Dette innebærer hovedsakelig innvendig etterisolering og utskiftning av vinduer og dører. Forslagene for oppgradering, samt en oversikt over den nåværende konstruksjonen, er gitt i Tabell 16.

Tabell 16. Oversikt over eksisterende konstruksjon, med antatte oppgraderinger av de aktuelle elementene. Tekst markert med kursiv og understreket skrift er fra Inger Andresens anbefalinger for oppgradering til TEK 10 standard i vedlagt notat om Energivurderinger bygg A (Rogaland Fylkeskommune, 2011)

	Eksisterende elementer	Oppgradering
Tak	240 mm armert betong 50 mm skumplastisolasjon 2 mm takteking	<i>Totalt 35 cm isolasjon</i> Antar utvendig ekstra isolasjon på 300 mm
Vinduer	2 lag isolerglass med aluminiumsramme. Antatt U-verdi på 2,9 W/(m ² K)	<i>Utbygging av eksisterende vinduer til 3 lags glass med LE-belegg og argon, isolert karm og ramme, total U-verdi maks 0,8 W/(m²K)</i>

	Eksisterende elementer	Oppgradering
Sandwichelementer	50 mm uarmert betong 50 mm isolasjon 60 mm uarmert betong	<u>Totalt 25 cm isolasjon</u> Antar innvendig ekstra isolasjon på 200 mm
Ribber	35 mm isolasjon 255 mm armert betong 20 mm isolasjon 425 mm armert betong	Antar innvendig ekstra isolasjon på 15 mm. Dette medfører slett innvendig vegg.
Dører	Antatt samme konstruksjon som vinduer. Dette gir en total U-verdi på 2,84 W/(m ² K)	<u>Velisolert, total U-verdi 1,2 W/(m²K)</u>

Som Tabell 16 indikerer, medfører en oppgradering til TEK 10 standard en helt ny situasjon i bygget med tanke på varmetap, U-verdier og kuldebroer. For taket vil dette innebære en økt isolasjonstykkelse på hele 600 %, og oppgradering av de andre bygningselementene, vil også gi en betydelig lavere U-verdi. Ved å utvide Thermmodellene som var beskrevet i Kapittel 3 med forslagene beskrevet i Tabell 16, er effekten av en slik oppgradering beregnet. Det er modellert nye vinduer og karmen som passer beskrivelsene og U-verdiene for oppgraderingen til TEK 10, men med unntak av dette er den eksisterende konstruksjonen beholdt. Det er heller ikke lagt inn noen ekstra kuldebrobrytere i modellene. Den samlede effekten av etterisolering og utskiftning av vinduer er beskrevet i Tabell 17.

Tabell 17. Sammenligning av transmisjonstap før og etter skifting av vinduer samt etterisolering. Merk at den normaliserte kuldebroverdien for bygget er beregnet for samme bruksareal som i dag, selv om dette normalt vil minke ved innvendig etterisolering. Siden det innebygde oppvarmingssystemet som er i bygget i dag må skiftes ut, vil ekstra isolasjon få plass her slik at BRA holdes tilnærmet konstant.

	Nåværende situasjon i bygget	Etter oppgradering til TEK 10 standard	Reduksjon
Effekttap gjennom fasade og tak ved $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	56,1 kW	14,1 kW	74,9 %
Effekttap forårsaket av kuldebroer ved $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	17,1 kW	10,6 kW	37,9 %
Total årlig energimengde inn/ut gjennom fasade og tak	247,9 MWh	57,8 MWh	76,6 %
Total årlig energimengde inn/ut forårsaket av kuldebroer	73,2 MWh	43,4 MWh	40,7 %
Normalisert kuldebroverdi for 2., 3. og 4. etasje i hovedbygget	0,27 W/(m ² K)	0,17 W/(m ² K)	37,0 %

Som forventet, viser Tabell 17 en tydelig reduksjon i effekttap gjennom fasader og tak etter oppgradering til TEK 10 standard. Dette har med at U-verdiene til hovedelementer i

bygningsskallet går kraftig ned. På årsbasis medfører dette en betydelig nedgang i det spesifikke oppvarmingsbehovet til bygget fra 108 kWh/m² til 25 kWh/m². Samtidig går kjølebehovet til bygget opp fra 0,7 kWh/m² til 6,5 kWh/m². Dette gir en samlet årlig reduksjon i energimengde som passerer bygningsskallet på 76,6 %. En hovedårsak til det økte kjølebehovet til bygget er at det ikke er regnet med solskjerming i noen av modellene. Etter oppgradering til TEK 10 standard, vil byggets evne til å holde på energi bli betydelig bedre, og oppvarming som kommer av solinnstråling på varme sommerdager, vil ikke forsvinne ut av bygget like effektivt som tidligere. Dette økte kjølebehovet kan enkelt reduseres ved installering av automatisk styrte utvendige persienner. Som det kommer frem av Tabell 17, påvirkes også den normaliserte kuldebroverdien til bygget av etterisolering. De fleste av byggets kuldebroverdier går ned, selv uten ekstra kuldebroreducerende tiltak. Unntakene er steder der den eksisterende konstruksjonen fører til store brudd i den nye isolasjonstykkelsen, slik som ved etasjeskiller og overgang til tak. Tabell 18 viser en oversikt over hvordan de enkelte kuldebroverdiene endres ved ekstra etterisolering.

Tabell 18. Endring i kuldebroverdier ved oppgradering til TEK 10 standard.

Beregnete kuldebroverdier, Ψ	Nåværende situasjon i bygget	Etter oppgradering til TEK 10 standard
Etasjeskille – Vegg, 3. og 4. et.	0,26 W/(mK)	0,50 W/(mK)
Etasjeskille – Ribbe, 3. og 4. et.	1,36 W/(mK)	0,83 W/(mK)
Etasjeskille, 2. et.	0,11 W/(mK)	0,78 W/(mK)
Kant over etasjeskille i 2. et.	0,01 W/(mK)	0,00 W/(mK)
Tak – Vegg	0,41 W/(mK)	0,38 W/(mK)
Tak – Ribbe	1,20 W/(mK)	0,81 W/(mK)
Ribbe – Vegg (hele ribben)	0,43 W/(mK)	0,11 W/(mK)
Enden på ribbene, 2. et.	0,45 W/(mK)	0,01 W/(mK)
Hjørner, 2. et.	0,05 W/(mK)	0,03 W/(mK)
Hjørner, 3. og 4. et.	1,03 W/(mK)	0,05 W/(mK)
Vegg – Nedre kant av vindu	0,51 W/(mK)	0,07 W/(mK)
Vegg – Øvre kant av vindu	0,24 W/(mK)	0,05 W/(mK)
Vindu – Ribbe (en side)	0,10 W/(mK)	0,11 W/(mK)

Som Tabell 18 viser, vil den etterisoleringen som er foreslått av Inger Andresen, redusere de fleste av byggets kuldebroverdier til et akseptabelt nivå på under 0,1 W/(mK). Den av de resterende verdiene som er enklest å gjøre noe med, er kuldebroen forårsaket av skillet mellom ribbe og vegg. Denne verdien synker fra 0,41 W/(mK) til 0,11 W/(mK), selv om det kun tilføres 1,5 cm ekstra isolasjon over ribben. Ved å øke den planlagte isolasjonstykkelsen med ytterligere

2 cm, vil kuldebroverdien reduseres til 0,09 W/(mK). En slik økning av isolasjonstykkelsen vil riktignok medføre et noe forminsknet bruksareal for bygget, men det er ikke snakk om mer enn ca 4 kvadratmeter, og for et areal på nesten 3 200 kvadratmeter ansees dette som ubetydelig. Ved å øke isolasjonstykkelsen med 20 cm, slik det er foreslått, vil bruksarealet til sammenligning reduseres med nesten 40 m². Siden det er antatt at dette arealet vil erstatte det eksisterende varmesystemet i bygget, er imidlertid bruksarealet til bygget regnet som uendret. En ytterligere reduksjon av kuldebroen forårsaket av overgang til ribbe, vil medføre stor innvirkning på den normaliserte kuldebroverdien til bygget. Dette skyldes et betydelig antall ribber. Samlet har denne kuldebroen en lengde på over 430 meter.

4.2 Forslag til ytterligere forbedring av kuldebroer

Kuldebroene ved overgang til etasjeskille og tak forblir høye etter oppgradering til TEK 10 standard. Disse kuldebroene er også de som det er vanskeligst å gjøre noe med, uten å gjøre dramatiske endringer i den eksisterende konstruksjonen. Et alternativ kan være å ta bort de eksisterende etasjeskillene slik at det er mulig å fortsette det innvendige isolasjonslaget langs hele fasaden. Deretter kan nye etasjeskiller bygges på innsiden på søyler som bærer vekten av de fristilte etasjene. Dette er imidlertid en omfattende og dyr prosess som neppe vil bli vurdert som en reell mulighet. En mer sannsynlig løsning er å etterisolere gulv og himlinger innvendig på samme måte som veggene. Ved å gjøre dette, isoleres etasjeskillene fra innerrommet, slik at kjernetemperaturen i betongen går ned. Det er mulig å etterisolere hele etasjeskillene på både over- og underside, eller det kan legges en kant av isolasjon langs fasaden. Utfordringen med begge disse løsningene er at de stjeler plass. Under etasjeskillet vil den ekstra isolasjonen ta opp plass som ellers kunne vært brukt til ventilasjonskanaler, elektrisk ledningsnett etc. og over etasjeskillet vil isolasjonen stjele himlingshøyde fra undervisningsrommet. Hvor mye isolering rundt etasjeskillene det er mulig å legge, er derfor helt avhengig av hvilke løsninger som blir valgt for byggets tekniske installasjoner. Ved bare å legge en isolasjonskant langs fasaden, vil det også være nødvendig å enten lage helling på gulvet, eller et opphøyd trinn eller repos langs veggene som vender ut mot fasaden. Dette kan gi en etterlengt mulighet for læreren til å holde bedre kontroll på de elevene som prøver å gjemme seg bort på bakerste rad. Men en slik løsning er neppe være særlig gunstig, verken bruksmessig eller estetisk. Ulempen med å legge et heldekkende lag isolasjon over etasjeskillet er ekstra arbeid og kostnader. En større mengde trykkfast isolasjon må legges, og over dette ekstra laget må det beregnes et påstøp på om lag 8 cm (Rønnevik, 2012, personlig samtale). Ved å anta at planløsningen til bygget skal beholdes,

medfører et heldekkende isolasjonslag også at innvendige dører må heves for å passe til den nye gulvflaten. For å kunne vurdere hvilken effekt de ulike alternativene vil ha for kuldebroverdien til etasjeskillet, er det vist eksempler på ulike isolasjonstykkelser på skilletets over- og underside. De beregnede kuldebroverdiene kan sees i Tabell 19.

Tabell 19. Kuldebroverdier for ulike isolasjonstykkelser over og under etasjeskillet. Det er tatt utgangspunkt i overgang til vegg og etasjeskillet mellom 2. og 3. eller 3. og 4. etasje. Bredde på 1 + 0,5 meter betyr 1 meter full tykkelse samt 0,5 meter gradvis helling. Betegnelsen - betyr heldekkende lag av isolasjon.

Isolasjonstykkelse over skillet [cm]	Ingen	2	5	5	10	10	5	5	10	5
Bredde på kant [m]		-	-	-	-	-	-	1+0,5	1+0,5	1+0,5
Isolasjonstykkelse under skillet [cm]	Ingen	5	5	10	10	10	10	5	10	10
Bredde på kant [m]		-	-	-	-	1+0,5	1+0,5	1+0,5	1+0,5	1+0,5
Kuldebroverdi [W/(mK)]	0,503	0,389	0,352	0,326	0,290	0,293	0,331	0,355	0,308	0,332

Som Tabell 19 viser, vil et heldekkende lag med isolasjon på 10 cm på etasjeskillenes over- og underside gi den største reduksjonen i kuldebroverdi. Dette er ikke overraskende med tanke på at dette alternativet innebærer mest ekstraisolasjon. En interessant observasjon er imidlertid hvor liten forskjell det er på heldekkende lag av isolasjon kontra en kant langs fasaden. Som det kan sees av tabellen, er det vanskelig å få kuldebroverdien noe særlig lavere enn 0,3 W/(mK) ved etterisolering av etasjeskillet, men det utgjør likevel en betydelig forskjell fra utgangspunktet.

På bakgrunn av verdiene over fremstår løsningen med heldekkende isolasjonstykkelse på 10 cm over skillet og en isolasjonskant langs fasaden under skillet som det beste alternativet. Dette fører til plant gulv og gir en betydelig reduksjon i kuldebroverdier. Med tanke på at det i dag er en innvendig himlingshøyde på ca 3,15 meter, ansees det heller ikke som umulig å bruke 18 cm til ekstra isolasjon og påstøp. For at dette tiltaket skal kunne gjennomføres, er det en forutsetning at byggets bæresystem tåler den ekstra lasten isolasjon og påstøp medfører. Dette er ikke kontrollert i denne oppgaven.

Isolasjonskanten under etasjeskillet kan medføre komplikasjoner i form av kollisjoner med eksisterende rørnett, ventilasjonskanaler eller elektrisk ledningsnett, slik at dette må legges om. Randisolasjonen trenger ikke å være høyere enn 10 cm, men den bør gå et stykke inn i rommet for å gi en vesentlig endring i varmetap. Dette er årsaken til regneeksemplene med bredde på 1

meter i Tabell 19. For å tifredsstille dagens krav, antas det at omlegging av kanaler og ledninger må gjøres i større eller mindre grad uansett. I dag er for eksempel store deler av ventilasjonsluften forbundet med oppvarmingssystemet som er bygget inn i underkant av vinduene. Dette er en løsning som nesten ikke brukes lenger, og ved å fylle disse rommene med ekstra isolasjon som foreslått av Inger Andresen, vil det i alle tilfeller være nødvendig med et nytt oppvarmingssystem. Dette vil medføre behov for endring av ventilasjonskanaler og rør i forbindelse med byggets sentralvarme.

Ved å anta en isolasjonsrand på 10 cm under taket på samme måte som under etasjeskillene vil også kuldebroverdien her reduseres. Mens kuldebroverdien før innvendig isolering av taket var på 0,380 W/(mK), vil en kant på 10 cm isolasjon føre til en kuldebroverdi på 0,202 W/(mK). 10 cm innvendig heldekkende isolasjon gir en kuldebroverdi på 0,175 W/(mK). På samme måte som for etasjeskillene regnes ikke denne differansen som stor nok til at det er grunnlag for å legge heldekkende isolasjon under betongelementene i taket. Å legge en 10 cm tykk kant av ekstra innvendig isolasjon under taket ansees derfor som tilstrekkelig for reduksjon av kuldebroer.

På bakgrunn av vurderingene beskrevet over, er det laget en samlet oversikt over spesifikke tiltak for å redusere kuldebroene i 2. 3. og 4. etasje ved hovedbygget på Gand Videregående skole. Disse tiltakene er beskrevet i Tabell 20, og kan kombineres på flere måter for ulik investeringskostnad og reduksjon i varmetap.

Tabell 20. forslag til ytterligere reduksjon av kuldebroer

Kuldebroer	Etter oppgradering til TEK 10 standard	Forslag til ytterligere kuldebroereduserende tiltak
Overgang mellom vegg og ribbe	$\Psi=0,11$ W/(mK). Dette er ikke en spesielt stor verdi, men er av betydning først og fremst på grunn av kuldebroens store antall lengdemeter i bygget	Øke den innvendige tykkelsen på isolasjon fra 20 til 22 cm.
Overgang mellom fasade og tak	$\Psi=0,38/0,81$ W/(mK). Taket er gitt mer enn nok ekstra utvendig isolasjon, men koblingen mellom inneluft, armert betong og uteluft er brutt av en minimal remse isolasjon og gir betydelige kuldebroverdier	10 cm tykk isolasjonskant langs fasader. Kanten settes til 1 m bred med gradvis hellingsbredde på 0,5 m.

Kuldebroer	Etter oppgradering til TEK 10 standard	Forslag til ytterligere kuldebroereduserende tiltak
Overgang mellom fasade og etasjeskiller	$\Psi=0,50/0,83/0,78$ W/(mK). Kobling mellom inneluft, armert betong og uteluft er brutt av en minimal remse isolasjon og gir betydelige kuldebroverdier	10 cm heldekkende eller randisolasjon over etasjeskillet. Undersiden isoleres med en 10 cm tykk randisolasjon langs fasade.

Det er tiltakene i Tabell 20 som er lagt til grunn for den følgende drøftingen i dette kapittelet, og som utgjør basisen for følgende alternativer for kuldebroereduserende tiltak:

Alternativ 1: Ekstra innvendig etterisolering av fasader, randisolasjon under tak, randisolasjon under etasjeskiller, og heldekkende isolasjon over etasjeskiller

Alternativ 2: Ekstra innvendig etterisolering av fasader, randisolasjon under tak, og randisolasjon under og over etasjeskiller

Alternativ 3: Ekstra innvendig etterisolering av fasader, randisolasjon under tak, randisolasjon under etasjeskiller, og ingen isolasjon over etasjeskiller

Alternativ 4: Ekstra innvendig etterisolering av fasader, randisolasjon under tak, og ingen isolasjon under eller over etasjeskiller

Felles for alle disse alternativene er ekstra innvendig etterisolering av fasader samt randisolasjon under tak. Disse tiltakene medfører liten ekstrakostnad, og usikkerheten rundt muligheten av gjennomførelse er betydelig mindre enn ved etterisolering av etasjeskillene. Det er derfor valgt å legge hovedfokus på muligheten av å redusere kuldebroer ved etasjeskiller for resten av dette kapittelet. Kapittel 4.3 tar for seg hvilken innvirkning de ulike alternativene vil ha for varmetap i bygget, mens kapittel 4.4 drøfter ekstrakostnadene disse tiltakene vil medføre i form av arbeid og ekstra materialer. Kapittel 4.5 gir en analyse av hvordan brukeren kan bli påvirket av ekstra kuldebroereduserende tiltak i form av økt komfort, kontra redusert gulvareal og himlingshøyde.

4.3 Varmetap

Som beskrevet i kapittel 4.2, vil kuldebroereduserende tiltak ha en positiv effekt på de spesifikke kuldebroene de er ment å redusere. I tillegg til dette vil de ha en innvirkning på resten av kuldebroene i bygget. 22 cm kontra 20 cm innvendig etterisolering av fasader vil for eksempel

påvirke både fasadenes U-verdi og alle andre kuldebroer i fasade. Dette fører til nødvendigheten av en ny oversikt over kuldebroer ved Gand Videregående Skole. Denne oversikten er gitt i Tabell 21.

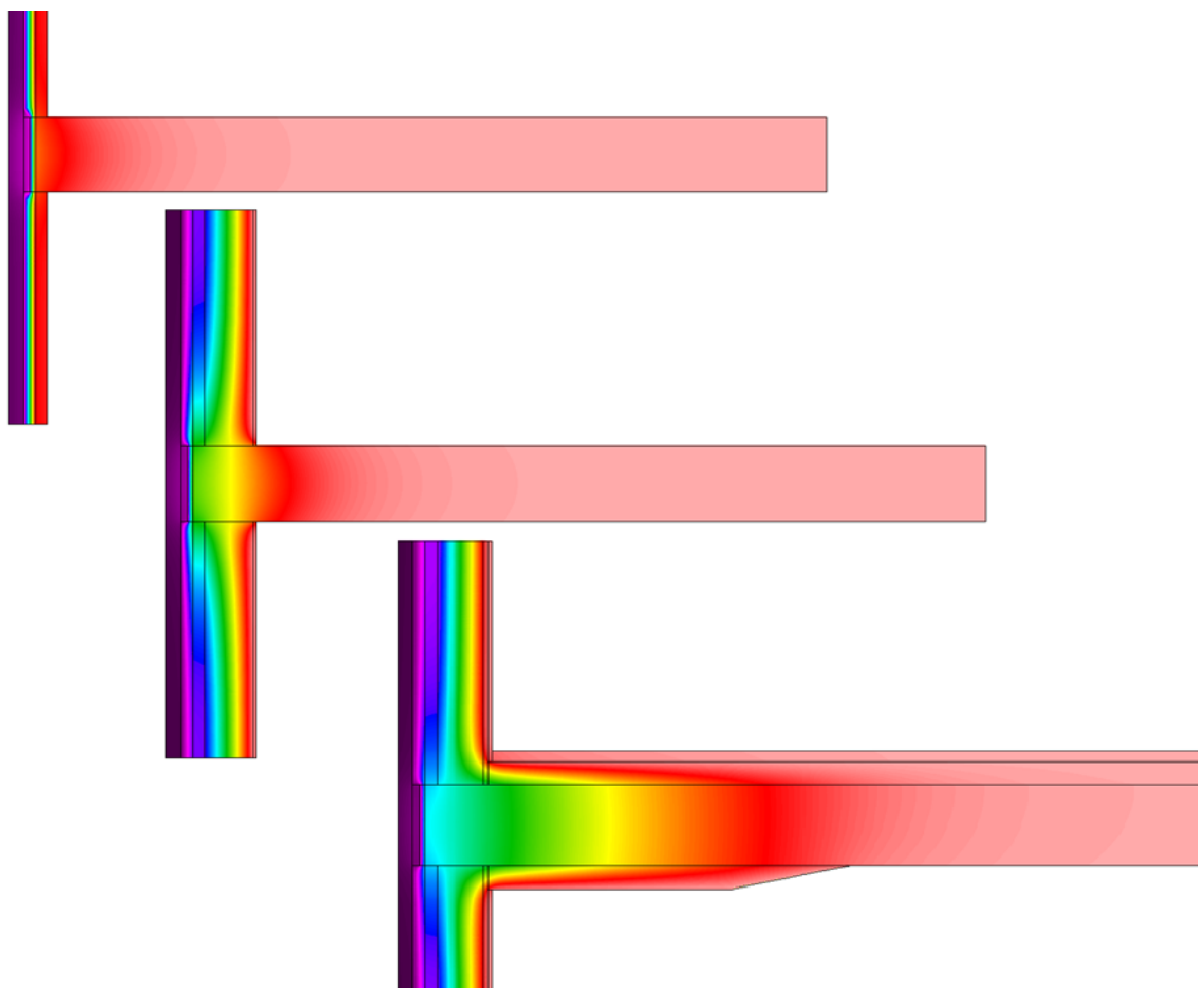
Tabell 21. Kuldebroverdier før og etter ekstra isolering og kuldebroreducerende tiltak

Beregnete kuldebroverdier, Ψ	Nåværende situasjon i bygget	Etter oppgradering til TEK 10 standard	Etter ytterligere tiltak for reduksjon av kuldebroer
Kant over etasjeskille i 2. et	0,01 W/(mK)	0,00 W/(mK)	0,00 W/(mK)
Tak – Vegg	0,41 W/(mK)	0,38 W/(mK)	0,20 W/(mK)
Tak – Ribbe	1,20 W/(mK)	0,81 W/(mK)	0,26 W/(mK)
Ribbe – Vegg (hele ribben)	0,43 W/(mK)	0,11 W/(mK)	0,09 W/(mK)
Enden på ribbene, 2. et	0,45 W/(mK)	0,01 W/(mK)	0,00 W/(mK)
Hjørner, 2. et.	0,05 W/(mK)	0,03 W/(mK)	0,03 W/(mK)
Hjørner, 3. og 4. et.	1,03 W/(mK)	0,05 W/(mK)	0,05 W/(mK)
Vegg – Nedre kant av vindu	0,51 W/(mK)	0,07 W/(mK)	0,07 W/(mK)
Vegg – Øvre kant av vindu	0,24 W/(mK)	0,05 W/(mK)	0,05 W/(mK)
Vindu – Ribbe (en side)	0,10 W/(mK)	0,11 W/(mK)	0,11 W/(mK)
Etasjeskille – Vegg, 3. og 4. et. Alternativ 1 Alternativ 2 Alternativ 3 Alternativ 4	0,26 W/(mK)	0,50 W/(mK)	0,29 W/(mK) 0,31 W/(mK) 0,46 W/(mK) 0,50 W/(mK)
Etasjeskille – Ribbe, 3. og 4. et. Alternativ 1 Alternativ 2 Alternativ 3 Alternativ 4	1,36 W/(mK)	0,83 W/(mK)	0,19 W/(mK) 0,21 W/(mK) 0,43 W/(mK) 0,51 W/(mK)
Etasjeskille, 2. etasje Alternativ 1 Alternativ 2 Alternativ 3 Alternativ 4	0,11 W/(mK)	0,78 W/(mK)	0,37 W/(mK) 0,40 W/(mK) 0,73 W/(mK) 0,81 W/(mK)
Normalisert kuldebroverdi Alternativ 1 Alternativ 2 Alternativ 3 Alternativ 4	0,268 W/(m ² K)	0,166 W/(m ² K)	0,122 W/(m ² K) 0,124 W/(m ² K) 0,145 W/(m ² K) 0,151 W/(m ² K)

Som Tabell 21 viser, vil de fleste kuldebroer i bygget holdes konstante eller reduseres ved ekstra isolasjon over ribber og ved etasjeskiller og tak. De fire alternativene gir imidlertid svært forskjellige kuldebroverdier for overgang til etasjeskiller. Alternativ 1 og 2 utpeker seg som klart best fra et varmetapsmessig perspektiv, mens Alternativ 3 og 4 gir liten eller ingen reduksjon i

kuldebroverdier rundt etasjeskiller. Dette vises også igjen i byggets normaliserte kuldebroverdi. Alle alternativene gir reduksjon i normalisert kuldebroverdi, men et spenn fra 0,12 til 0,15 W/(m²K) utgjør en betydelig forskjell. Som tabellen viser medfører både Alternativ 1 og 2 en reduksjon av den normaliserte kuldebroverdien i bygget til 0,12 W/(m²K). Dette tilsvarer normtallet gitt av Norsk Standard for et nytt bygg i betong med 5 cm kuldebrobryter. Det må minnes om at verdiene gitt av Tabell 21 er basert på de beregnede normalverdiene fra simuleringer i Therm. Ved å ta hensyn til usikkerhetsmarginen som Therm selv oppgir, vil dette si at den normaliserte kuldebroverdien til bygget ligger et sted mellom 0,10 og 0,14 W/(m²K) etter kuldebroreduserende tiltak. Andre usikkerhetsmomenter, som for eksempel feil i tegningsgrunnlag, eller antakelser om materialers konduktivitet, vil kunne øke differansen mellom disse verdiene ytterligere. Dette er imidlertid usikkerheter som vil gjelde for alle scenarioene, og som vil gi justerte tallverdier, men med ulik grad.

Som en følge av kuldebroreduserende tiltak rundt etasjeskiller, vil temperaturfordelingen gjennom tverrsnittet endres. Et eksempel på dette er vist i Figur 24 der kuldebroen ved overgang mellom etasjeskille og vegg i 3. og 4. etasje er vist med isotermer gjennom tverrsnittet. De tre figurene illustrerer kuldebroen i dag, kuldebroen etter oppgradering til TEK 10 standard, samt kuldebroen ved alternativ 1. Som figuren viser, fører ekstra isolasjon til større avstand mellom isotermene og mindre varmetap. Den nederste figuren, som i utgangspunktet ser mest dramatisk ut, er altså den varianten med minst varmetap. Den enkleste måten å se dette på er ved å studere temperaturen på fasadens utside. En jevn mørk lilla farge viser liten temperaturforandring og indikerer liten kuldebroverdi. Selv om kjernetemperaturen i etasjeskillet går ned etter kuldebroreduserende tiltak, viser figuren også at temperaturen på overflaten holdes mer konstant. Dette vil føre til mindre merkbare temperaturforandringer i rommet, og gulvet vil ikke kjennes like kaldt langs innsiden av veggen.



Figur 24. Temperaturfordeling i tverrsnitt ved ulike grad av etterisolering. Overgang mellom etasjeskille og sandwichelement.

Nye kuldebroverdier og endret U-verdi for fasaden fører til en forandring av det totale varmetapsbildet i hovedbygget ved Gand Videregående Skole. En sammenligning av nøkkeltallene for de ulike alternativene er vist i Tabell 22. Det er tatt hensyn til redusert bruksareal og himlingshøyde ved etterisolering.

Tabell 22. Nøkkeltall for bygget før og etter etterisolering og kuldebroreduserende tiltak.

	Nåværende situasjon i bygget	TEK 10 standard	Etter kuldebro- reduserende tiltak
Effekttap gjennom fasade og tak ved $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	56,1 kW	14,1 kW	
Alternativ 1			14,0 kW
Alternativ 2			14,0 kW
Alternativ 3			14,0 kW
Alternativ 4			14,0 kW
Effekttap forårsaket av kuldebroer ved $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	17,1 kW	10,6 kW	
Alternativ 1			7,7 kW
Alternativ 2			7,8 kW
Alternativ 3			9,1 kW
Alternativ 4			9,5 kW
Totalt effekttap ved $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	73,2 kW	24,7 kW	
Alternativ 1			21,7 kW
Alternativ 2			21,8 kW
Alternativ 3			23,1 kW
Alternativ 4			23,5 kW
Total årlig energimengde inn/ut gjennom fasade og tak	247,9 MWh	57,8 MWh	
Alternativ 1			59,6 MWh
Alternativ 2			59,5 MWh
Alternativ 3			58,3 MWh
Alternativ 4			58,0 MWh
Total årlig energimengde inn/ut forårsaket av kuldebroer	73,2 MWh	43,4 MWh	
Alternativ 1			32,8 MWh
Alternativ 2			33,2 MWh
Alternativ 3			37,9 MWh
Alternativ 4			39,3 MWh
Total årlig energimengde inn/ut	321,1 MWh	101,3 MWh	
Alternativ 1			92,4 MWh
Alternativ 2			92,7 MWh
Alternativ 3			96,2 MWh
Alternativ 4			97,3 MWh

Som Tabell 22 viser, vil også det årlige energibehovet til bygget synke ved utføring av kuldebroreduserende tiltak. Tabellen viser en reduksjon på om lag 8,9 MWh årlig fra TEK 10 standard til Alternativ 1, men ved installering av solskjerming vil differansen øke ytterligere. Dette er fordi ekstra isolering fører til at en stadig større andel av byggets energibehov går med til kjøling. For Gand Videregående Skole vil over 26 % av det totale energibehovet til bygget

være forbeholdt kjøling etter innføring av alternativ 1. Årlig innebærer dette om lag 4 MWh mer enn ved oppgradering til TEK 10 standard, der andelen var på om lag 20 %.

Selv om det tas hensyn til effekten av solskjermingstiltak, gir Tabell 22 grunn til å konkludere med at differansen i totalt varmetap mellom de ulike alternativene ikke er av spesielt stor betydning. Alternativene utgjør med andre ord store forskjeller i spesifikke kuldebroverdier, men for den samlede effekten i bygget har det ikke så mye å si om Alternativ 1 eller 4 velges. Den årlige forskjellen i transmisjonstap på 4,9 MWh mellom Alternativ 1 og 4 er liten sett i forhold til den store forskjellen en oppgradering til TEK 10 standard vil utgjøre. Kostnaden av alternativene, samt innvirkning på brukskomfort, vil derfor ha stor betydning for hvilket, om noen, av alternativene som bør gjennomføres.

4.4 Økonomisk bærekraft av kuldebroereduserende tiltak

Under utbygging vil kuldebroereduserende tiltak komme som en ekstrakostnad. Hvor stor totalkostnaden av tiltakene vil være, er svært avhengig av hvilken grad de påvirker byggets tekniske anlegg. Dersom tiltakene gjør det nødvendig å legge om ventilasjonskanaler og elektrisk ledningsnett som ellers kunne blitt værende, vil dette medføre store ekstrakostnader til prosjektering, materialer og arbeid. Siden det er uvisst hvor mye av nettet som kan beholdes, er det valgt å holde dette utenfor i denne oppgaven. Dette kapittelet tar med andre ord kun for seg ekstrakostnader i form av materialer og arbeid ved legging av ekstra isolasjon. Det er også forutsatt at oppgradering til TEK 10 standard vil bli gjennomført, samt at byggets innervegger beholdes. Siden byggets bæresystem er basert på søyler i fasade, samt en innvendig sløyfe med bærende søyler, antas det at alle innvendige vegger er lettvegger. Ved bærende betongvegger vil heving av dører medføre en høyere kostnad enn det som er estimert for Alternativ 1.

Prisene benyttet i beregningene er grove estimater utviklet i samarbeid med ekstern veileder. De estimerte kostnadene er ikke absolutte, men ment til å gi et bilde av størrelsesomfanget av det arbeidet som må utføres for hvert av de 4 alternativene. Arbeidskostnaden av å etterisolere fasader med 20 mm ekstra er satt til null for alle beregningene. Årsaken til dette er at fasadene likevel skal etterisoleres innvendig ved oppgradering til TEK 10 standard, og det regnes ikke med ekstra arbeid ved å benytte en litt større tykkelse på isolasjonen.

For å gi et bilde av kostnadseffektiviteten til de ulike kuldebroereduserende tiltakene, er det tatt hensyn til den reduserte driftskostnaden som følger av et redusert varmetap. Også her er

beregningene forenklet til et svært grovt anslag, og kostnadsbesparelse i form av endringer i installert effekt for oppvarmingssystemet er for eksempel ikke tatt hensyn til. Den reduserte driftskostnaden er beregnet i form av reduksjon på strømrregningen ved å anta elektrisk romoppvarming og kjøling. Systemvirkningsgrad og effektfaktor er satt til henholdsvis 0,88 og 2,4 som tilsvarer elektriske radiatorer, og luft til luft kjølemaskin med større aggregat. Elektrisitetspris er forenklet satt til 80 øre/kWh.

4.4.1 Alternativ 1

En grov oversikt over antatt materialkostnad samt ekstra arbeidskostnader er gitt i Tabell 23. Samlet gir de en total prislapp på om lag 7 950 000 kr for tiltakene. En årsak til denne høye prisen er det ekstraarbeidet som følger av at alle innvendige dører må heves. Dette vil ikke være nødvendig dersom planløsning ønskes endret, da innervegger vil måtte erstattes uansett. En annen hovedårsak til den høye prisen er den store flaten trykkfast isolasjon, påstøp og gulvbelegg som må legges ved dette alternativet. De tre etasjene har et samlet flateareal på over 3 000 m². Dette vil medføre behov for en stor mengde materialer og belegningsarbeid ved etterisolering.

Tabell 23. Material- og arbeidskostnader for Alternativ 1, heldekkende isolasjon over etasjeskiller, randisolasjon under etasjeskiller

Materialer og arbeid	Material mengde og antall arbeidstimer	Enhetspris/timespris eks mva	Sum
100 mm trykkfast isolasjon, 80 mm påstøp + vinyl	3 x 35,55 m x 29,55 m = 3 152 m ²	1 200 kr/m ²	3 782 400 kr
Utviding av utsparring av dør i lettvegg	47 dører + 43 dører + 26 dører = 116 dører	1 000 kr/dør	116 000 kr
Nye dører	116 dører	5 000 kr/dør	580 000 kr
Nye lister + maling rundt dører	116 dører	250 kr/dør	290 000 kr
100 mm randisolasjon under etasjeskille og tak	4 x 130,2 lm = 521 lm	450 kr/lm	234 450 kr
20 mm tykkere isolasjon i fasade	(130,2 m x 4,4 m) + (3,4 m x 0,25 m x 128) = 682 m ²	40 kr/m ²	27 280 kr
Etterisolering, påstøp, avretting og legging av vinyl over etasjeskiller	0,5 t/m ² x 3 152 m ² = 1 576 timer	550 kr/t	866 800 kr
Utviding av utsparring for dører i lettvegger	2 t/dør x 116 dører = 232 timer	550 kr/t	127 600 kr

Materialer og arbeid	Material mengde og antall arbeidstimer	Enhetspris/timespris eks mva	Sum
Riving og demontering av dører og lister for dører	0,5 t/dør x 116 dører = 58 timer	550 kr/t	31 900 kr
Innsetting av nye dører	1 t/dør x 116 dører = 116 timer	550 kr/t	63 800 kr
Innsetting av nye lister ved dører samt maling	1,5 t/dør x 116 dører = 174 timer	550 kr/t	95 700 kr
Etterisolering under etasjeskiller og tak	0,5 t/lm x 521 lm = 261 timer	550 kr/t	143 550 kr
Ekstra isolering av fasader	0 timer	550 kr/t	0 kr
Sum:			6 359 480 kr
Sum inkl. 25 % mva:			7 949 350 kr

Reduksjon i årlig oppvarmingsbehov gitt av Alternativ 1 er beregnet til 12 444 kWh sett i forhold til TEK 10 standard. Med en systemvirkningsgrad på 0,88 for oppvarmingssystemet, gir dette en reduksjon i levert energi på 13 827 kWh og en årlig besparelse på 11 061 kr. Samtidig øker byggets kjølebehov, noe som gir en økt kjølekostnad på 1 880 kr. Til sammen utgjør dette en årlig besparelse på 9 181 kr.

Sett i forhold til de nesten åtte millioner kronene utbedringen er antatt å koste, er det ikke vanskelig å forstå at denne investeringen er vanskelig å prioritere. Selv om det sees bort i fra internrenter, får tiltaket en tilbakebetalingstid på godt over 800 år. Det kan med andre ord slås fast at utbedring av kuldebroer på Gand Videregående Skole ved heldekkende isolasjon over etasjeskiller definitivt ikke er noe lønnsomt prosjekt.

4.4.2 Alternativ 2

Et kostnadsoverslag for utbedring av kuldebroer ved Alternativ 2 er gitt i Tabell 24. Sett i forhold til Alternativ 1 er prislappen for dette tiltaket kraftig redusert.

Tabell 24. Material- og arbeidskostnader for Alternativ 2, randisolasjon over og under etasjeskiller

Materialer og arbeid	Material mengde og antall arbeidstimer	Enhetspris/timespris eks mva	Sum
100 mm trykkfast isolasjon, 80 mm påstøp + vinyl	3 x 130,2 lm x 1,5 m = 586 m ²	1 200 kr/m ²	703 200 kr
100 mm randisolasjon under etasjeskille og tak	4 x 130,2 lm = 521 lm	450 kr/lm	234 450 kr
20 mm tykkere isolasjon i fasade	(130,2 m x 4,4 m) + (3,4 m x 0,25 m x 128) = 682 m ²	40 kr/m ²	27 280 kr

Materialer og arbeid	Material mengde og antall arbeidstimer	Enhetspris/timespris eks mva	Sum
Etterisolering, påstøp, avretting og legging av vinyl over etasjeskiller	0,5 t/m ² x 586 m ² = 293 timer	550 kr/t	160 150 kr
Etterisolering under etasjeskiller og tak	0,5 t/lm x 521 lm = 261 timer	550 kr/t	143 550 kr
Ekstra isolering av fasader	0 timer	550 kr/t	0 kr
Sum:			1 268 630 kr
Sum inkl. 25 % mva:			1 585 788 kr

For Alternativ 2 er det reduserte oppvarmingsbehovet på 12 017 kWh sett i forhold til TEK 10 standard, mens kjølebehovet økes med 3 339 kWh. Samlet utgjør dette en reduksjon i årlig mengde levert energi på 11 126 kWh, og en besparelse på 8 901 kr. Ved å se bort i fra internrenter gir dette investeringen en tilbakebetalingstid på 178 år.

Sett i forhold til tilbakebetalingstiden for Alternativ 1 er 178 år en stor forbedring, men det er likevel ikke godt nok til at investeringen kan kalles lønnsom. Dersom Alternativ 2 skal velges for reduksjon av kuldebroer, må det altså godtas at dette er penger som aldri vil tjenes inn igjen, og tiltaket må velges ut i fra ideologiske tanker om redusert forbruk, eller for å øke brukskomforten i bygget.

4.4.3 Alternativ 3

For Alternativ 3 er den estimerte investeringskostnaden gitt i Tabell 25. For dette alternativet er etasjeskillenes overside beholdt som i dag, mens undersiden isoleres med randisolasjon. Dette alternativet medfører derfor ingen ekstrakostnader til trykkfast isolasjon, påstøp og ekstra gulvbelegg, men normalisert kuldebroverdi og årlig energibesparelse er også dårligere enn for alternativene over.

Tabell 25. Material- og arbeidskostnader for Alternativ 3, randisolasjon under etasjeskiller, ingen isolasjon over etasjeskiller

Materialer og arbeid	Material mengde og antall arbeidstimer	Enhetspris/timespris eks mva	Sum
100 mm randisolasjon under etasjeskille og tak	4 x 130,2 lm = 521 lm	450 kr/lm	234 450 kr
20 mm tykkere isolasjon i fasade	(130,2 m x 4,4 m) + (3,4 m x 0,25 m x 128) = 682 m ²	40 kr/m ²	27 280 kr
Etterisolering under etasjeskiller og tak	0,5 t/lm x 521 lm = 261 timer	550 kr/t	143 550 kr
Ekstra isolering av fasader	0 timer	550 kr/t	0 kr
Sum:			405 280 kr
Sum inkl. 25 % mva:			506 600 kr

Sett i forhold til TEK 10 standard utgjør Alternativ 3 en reduksjon i årlig oppvarmingsbehov på 6 939 kWh og en økning i årlig kjølebehov på 1 885 kWh. Samlet gir dette en årlig besparelse i mengde kjøpt elektrisitet på 6 453 kWh. Med en energipris på 80 øre/kWh utgjør dette en årlig besparelse på 5 162 kr, og en tilbakebetalingstid på 98 år for hele investeringen.

4.4.4 Alternativ 4

Alternativ 4 medfører ingen ekstra isolering av etasjeskiller, og prislappen på tiltaket reduseres dermed ytterligere. Den totale estimerte kostnadene for materialer og arbeid er gitt i Tabell 26, og viser en totalpris på 152 000 kr.

Tabell 26. Material- og arbeidskostnader for Alternativ 4, ingen isolasjon over eller under etasjeskiller

Materialer og arbeid	Material mengde og antall arbeidstimer	Enhetspris/timespris eks mva	Sum
100 mm randisolasjon under tak	1 x 130,2 lm = 130,2 lm	450 kr/lm	58 590 kr
20 mm tykkere isolasjon i fasade	(130,2 m x 4,4 m) + (3,4 m x 0,25 m x 128) = 682 m ²	40 kr/m ²	27 280 kr
Etterisolering under tak	0,5 t/lm x 130,2 lm = 65,1 timer	550 kr/t	35 805 kr
Ekstra isolering av fasader	0 timer	550 kr/t	0 kr
Sum:			121 675 kr
Sum inkl. 25 % mva:			152 094 kr

Ved å benytte samme regnemetode som for de øvrige alternativene, medfører Alternativ 4 en reduksjon i årlig mengde kjøpt energi på 5 018 kWh. Dette tilsvarer en årlig besparelse på 4 015

kr og en tilbakebetalingstid på 38 år. Dette er på grensen til hva som kan vurderes som fornuftig ut i fra et økonomisk perspektiv. Investeringen kan fremdeles ikke betraktes som særlig lønnsom, men ved å anta en levetid for bygget på 50 år, er det likevel rimelig å anta at den ekstra isolasjonen vil gi avkastning.

4.4.5 Oppsummering

Beregningene over gir svært store forskjeller i økonomisk gevinst for de ulike utbedringsalternativene. Mens Alternativ 1 ligger i en helt egen klasse med tanke på kostnader, kan Alternativ 4 forsvares ut i fra et økonomisk standpunkt. Det kan også være interessant å se de ulike alternativene i sammenheng med andre energibesparende tiltak som er antatt i forbindelse med oppgradering til TEK 10 standard. Tabell 27 gir en oversikt over estimert investeringskostnad i forhold til reduksjon i totalt årlig transmisjonstap. Det er også beregnet en spesifikk pris som forteller hvor mye det koster å redusere det årlige transmisjonstapet med en kWh. Som tabellen viser er det svært store forskjeller i hvor mye "valuta for pengene" de ulike alternativene medfører.

Tabell 27. Sammenligning av alternativene for utbedring av kuldebroer

	Årlig besparelse i energibehov	Antatt investeringskostnad	Spesifikk pris
Reduksjon av kuldebroer, Alternativ 1	8,92 MWh	7 949 350 kr	891 kr/kWh
Reduksjon av kuldebroer Alternativ 2	8,62 MWh	1 585 788 kr	184 kr/kWh
Reduksjon av kuldebroer Alternativ 3	5,05 MWh	506 600 kr	100 kr/kWh
Reduksjon av kuldebroer Alternativ 4	3,94 MWh	152 094 kr	38,6 kr/kWh
Utskiftning av vinduer	110 MWh	3 514 000 kr	31,9 kr/kWh
Innvendig etterisolering av fasader	38,6 MWh	270 000 kr	7,0 kr/kWh

De to nederste prisene er hentet fra arkitektens underlagskalkyle, som er en del av forprosjektet for oppgraderingen av Gand Videregående Skole. Som det kan sees av Tabell 27 er innvendig etterisolering av fasader det tiltaket som gir desidert best avkastning. Den antatte investeringskostnaden innebærer riktignok ikke kostnader for demontering av byggets eksisterende oppvarmingssystem, som befinner seg på fasadens innside, men kun legging av ekstra isolasjon og gipsplater. En interessant observasjon er hvor liten forskjell det er på den spesifikke prisen av utskiftning av vinduer kontra Alternativ 4. Dette styrker påstanden om at

Alternativ 4 kan være en reel mulighet for utbedring av kuldebroer ved hovedbygget på Gand Videregående Skole.

Når det er snakk om det økonomiske aspektet ved rehabilitering av en skole, må det også nevnes at et slikt prosjekt i sin helhet ikke kan karakteriseres som lønnsomt. Skoledrift generelt er ikke noe fylkeskommunen gjør for å tjene penger, og når bygninger slites ut og trenger oppgraderinger, medfører dette store investeringskostnader. Det må også tas i betraktning at dette er snakk om et rehabiliteringsprosjekt der det sjelden er mulig å forutse alle utfordringer på forhånd. Kostnadene vil derfor kunne øke mye mer enn antatt ved realisering. Det er likevel stor forskjell på hvilke tiltak som gir mest igjen for pengene, og utbedring av kuldebroer er sannsynligvis ikke det tiltaket som vil stå høyest på prioriteringslisten.

4.5 Brukerkomfort og innvendig utforming

Fordeler med utbedring av kuldebroer er ikke kun redusering av strømmregningen, men det vil også gi en jevnere overflatetemperatur på byggets innvendige og utvendige flater. I noen tilfeller kan den innvendige overflatetemperaturen i nærheten av en kuldebro bli så lav at fuktighet i luften kondenserer i kontakt med flaten. Dersom dette er et tilbakevendende problem, kan det oppstå muggsopp på overflaten, eller materialene kan råtne. Dette vil ikke være noe stort problem ved Gand Videregående Skole etter oppgradering til TEK 10 standard. En utjevning av overflatetemperaturer vil først og fremst være av betydning for hvordan brukeren opplever innerommet. Mindre temperaturfall rundt kuldebroer gjør at bygget føles mer robust, og det er lettere å finne en innetemperatur som mange er fornøyd med. Samtidig må det arealet som trengs for ekstra isolasjon tas med i betraktning. Ugunstige vinkler og ulike nivåer på gulvet fører til en redusert fleksibilitet med tanke på bruken av bygget. En lavere himlingshøyde gir redusert romfølelse. Ekstra innvendig isolering fører til at tykkelsen på veggen øker, og mindre lys vil slippe inn i rommet. Mens Alternativ 3 og 4 medfører liten endring i areal og volum av klasserommene, vil Alternativ 1 og 2 være mer synlige med det blotte øyet.

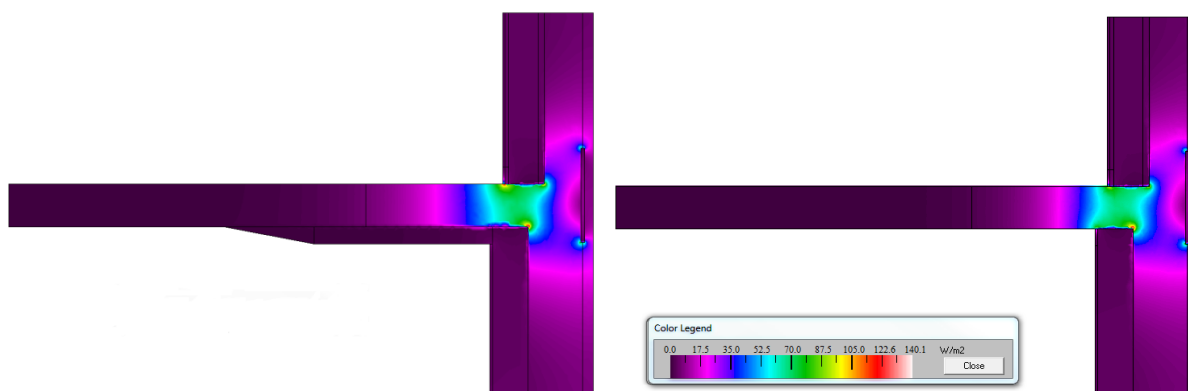
Alternativ 1 gir plan gulvflate, men kan medføre en reduksjon av himlingshøyden gjennom hele bygget. Dette alternativet er det kuldebroereduserende tiltaket som gir størst utbytte i form av lavere transmisjonstap og minst endring i innvendig overflatetemperatur. Likevel er det ikke en automatisk sammenheng mellom de to. Ekstra etterisolering av fasade kan føre til en høyere kuldebroverdi for etasjeskillet og lavere overflatetemperaturer i overgangen. En oversikt over overflatetemperaturer på utvalgte punkter er vist i Tabell 28. Med unntak av overgangen

mellom tak og fasade, er alle de valgte punktene svært nær hjørnet for den aktuelle overgangen. Her vil overflatetemperaturen være lavest, mens den raskt stabiliserer seg lenger inn i rommet. Generelt er ikke noen av overflatetemperaturene vist i Tabell 28 lave nok til å skape nevneverdig sjenanse for byggets brukere. Til sammenligning ble det målt en overflatetemperatur på 7,2 °C på sideflaten av ribbe omtrent en cm fra overgang til vindu i forbindelse med termograferingen på Gand Videregående Skole.

Tabell 28. Innvendige overflatetemperaturer ved innetemperatur på 20 °C og utetemperatur 0 °C

	Gand i dag	Tek 10 standard	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3	Alternativ 4
Sandwichelementer 1 cm opp fra gulvflate	17,6 °C	18,0 °C	19,5 °C	19,5 °C	17,7 °C	18,2 °C
Ribber 1 cm rett opp fra gulvflaten	17,7 °C	16,5 °C	19,2 °C	19,1 °C	17,0 °C	17,6 °C
Innvendig vegg 2. et. 1 cm opp fra gulvflate	17,2 °C	17,7 °C	19,3 °C	19,3 °C	16,1	16,5 °C
Gulvflaten 1 cm inn i rommet fra innvendig veggflate	17,6 °C	17,1 °C	19,3 °C	19,3 °C	16,2 °C	17,1 °C
Gulvflate 2. et. 1 cm inn fra veggflate	16,1 °C	16,1 °C	19,1 °C	19,1 °C	13,7 °C	14,5 °C
Sandwichelementer 30 cm ned fra takkonstruksjon	18,2 °C	19,6 °C	19,7 °C			
Ribber 30 cm ned fra takkonstruksjon	16,4 °C	18,2 °C	19,1 °C			

En interessant observasjon fra Tabell 28 er overflatetemperaturer rundt etasjeskillene for Alternativ 3 og 4. Ved ekstra etterisolering av fasader reduseres gulvets overflatetemperatur ved overgangen til vegg. Spesielt i byggets 2. etasje er denne forskjellen registrerbar. Det er også interessant at randisolasjon under etasjeskille, vil føre til en lavere overflatetemperatur på skillets overside enn ingen ekstraisolering rundt etasjeskillet. Dette har med at energi velger enkleste vei gjennom et tverrsnitt, og ved randisolasjon under skillet vil enkleste vei være fra oversiden av gulvflaten og videre ut gjennom betongen. Dette er illustrert i Figur 25 som viser et tverrsnitt utført ved Alternativ 3 til venstre og Alternativ 4 til høyre. Som figuren viser er det liten forskjell i varmefluksen for de to tverrsnittene, men generelt er det litt mer aktivitet ved Alternativ 3.



Figur 25. Varmefluks ved kuldebro i overgang mellom etasjeskillet og vegg mellom første og andre etasje. Tverrsnittet til venstre viser Alternativ 3 og tverrsnittet til høyre viser Alternativ 4.

På bakgrunn av estimerte innvendige overflatetemperaturer rundt etasjeskille, kan det konkluderes med at temperaturforskjellene mellom de ulike alternativene ikke er store nok til at de utgjør en betydelig forbedring av brukerens komfort. Randisolasjon på etasjeskilletts overside, eller generell reduksjon av himlingshøyde, kan derfor ikke forsvares ut fra et brukerperspektiv. På bakgrunn av overflatetemperaturer er Alternativ 4 også å foretrekke fremfor Alternativ 3. Forskjellen mellom de to er imidlertid neglisjerbar og ingen av alternativene medfører noen vesentlige inngrep i undervisningsrommet.

5 Konklusjon og drøfting

5.1 Drøfting av resultater i forhold til problemstilling

I dag har Gand Videregående Skole et relativt stort årlig transmisjonstap. Dette kommer av lite isolasjon i fasade og tak samt gamle vinduer med høy U-verdi. Da den aktuelle delen av skolen ble bygget i 1968, var kravene til isolasjon svært annerledes enn i dag. De siste årene har det vært et stort fokus på energieffektivisering i byggebransjen, og krav og forventninger har utviklet seg raskt på områder som transmisjonstap gjennom bygningskropper, lavt strømforbruk på elektriske komponenter og alternative energikilder. Dette gjør at hovedbygget ved Gand må gjennom en betydelig rehabilitering for å kunne nærme seg standarden til et moderne bygg.

Skolebyggets årlige transmisjonstap gjennom fasade og tak er i dag beregnet til å ligge på omtrent 320 MWh, der 23 % skyldes kuldebroer. Dette er en betydelig andel og medfører en normalisert kuldebroverdi på 0,27 W/(m²K). Utbedring av kuldebroer er likevel ikke hensiktsmessig å vurdere som et separat tiltak for det nåværende skolebygget. Årsaken til dette er at byggets kuldebroverdier vil endres ved etterisolering av fasader og tak. De fleste kuldebroene vil minke betraktelig ved tilføring av ekstra innvendig isolasjon, mens kuldebroer forårsaket av etasjeskiller vil øke i verdi. Grunnen til dette er at kuldebroer som for eksempel hjørner og ribber vil pakkes inn av det nye isolasjonslaget, og bli mindre alvorlige. Etasjeskillene derimot, blir stående som en nesten ubrutt forbindelse av armert betong mellom byggets varme innside og den kalde uteluften. På tross av dette er den samlede effekten av innvendig etterisolering klart positiv på varmetap gjennom kuldebroer. Etter en foreslått oppgradering bestående av utskiftning av vinduer og dører og et isolasjonslag på 250 mm i fasader og 350 mm i tak, vil den normaliserte kuldebroverdien til bygget endres til 0,17 W/(m²K). Dette er en stor reduksjon i normalisert kuldebroverdi, men likevel utgjør kuldebroer en høyere andel av byggets totale transmisjonstap. Tiltakene vil medføre en økning fra tidligere andel på 23 % til hele 43 % etter rehabilitering.

Selv om byggets normaliserte kuldebroverdi reduseres betydelig ved etterisolering, er fremdeles enkelte kuldebroer svært høye sett i forhold til dagens standard. Dette gjelder spesielt kuldebroer forårsaket av etasjeskiller og overgang mellom vegg og tak. I tillegg er kuldebroene i overgang mellom sandwichelementer og ribber i fasaden høyere enn hva som er ønskelig med en verdi på 0,11 W/(mK). Dette er en liten kuldebroverdi sammenlignet med de overnevnte

overgangene, men den har likevel betydning på grunn av det store antallet ribber i bygget. Ved å øke den innvendige tykkelsen på ekstra isolasjon fra 200 mm til 220 mm kan denne kuldebroverdien reduseres til 0,06 W/(mK) uten betydelige konsekvenser i form av ekstrakostnader eller redusert bruksareal.

Kuldebroer i forbindelse med etasjeskiller og overgang til tak er mer kompliserte å utbedre. For taket er det antatt utvendig etterisolering, da dette er det enkleste alternativet, samtidig som det ikke forringer byggets arkitektoniske uttrykk. Med hensyn til kuldebroer gir dette imidlertid den samme utfordringen som for byggets etasjeskiller, og det oppstår en nesten ubrutt overgang mellom innside og utside gjennom betongdekket. Prinsippet ved utbedring av de to kuldebroene vil derfor være det samme. Den mest effektive måten å redusere disse kuldebroene på vil være å erstatte de eksisterende etasjeskillene med nye og mindre dekker båret av søyler. På denne måten kan det innvendige isolasjonslaget fortsettes langs hele fasadeflaten og kuldebroen elimineres. Dette er imidlertid en massiv endring av hele byggets konstruksjon og regnes som uaktuelt på grunn av kostnaden ved et slikt arbeid. Det resterende alternativet er da etterisolering over og under dekker.

Etterisolering over og under etasjeskiller og tak kan gjøres på forskjellige måter med hver sine fordeler og ulemper. Den varianten som gir størst forbedring av kuldebroverdiene, er et lag av heldekkende isolasjon under tak og på begge sider av etasjeskillene. Dette fører til plane praktiske flater, men stjeler mye av den innvendige himlingshøyden. I tillegg er dette et kostbart alternativ, da det kreves store mengder vanlig og trykkfast isolasjon. Over etasjeskillene må det legges nytt påstøp og gulvbelegg, og alle innvendige dører må heves. Under etasjeskillene må alle rør, kanaler og ledninger legges på nytt. Dette alternativet medfører også spørsmål om den eksisterende konstruksjonen tåler vekten av en så stor mengde ekstra materialer.

En variant som er lettere å gjennomføre, og med nesten like stor effekt i forhold til varmetap, er ekstra isolasjon under tak langs fasadene og på begge sider av etasjeskillene. Det antas at en slik løsning vil medføre mindre komplikasjoner i underkant av dekker, og samtidig reduseres ekstra materialer og arbeid betraktelig. Over etasjeskillene vil imidlertid en slik kant føre til ulikt nivå på gulv og forringe anvendeligheten av rommene.

På bakgrunn av dette er det vurdert følgende fire alternative løsninger for utbedring av kuldebroer i bygget:

- Alternativ 1 – Randisolasjon under- og heldekkende isolasjon over etasjeskiller. Ekstra innvendig isolasjon av fasader og randisolasjon under betongdekke i tak.
- Alternativ 2 – Randisolasjon over og under etasjeskiller. Ekstra innvendig isolasjon av fasader og randisolasjon under betongdekke i tak.
- Alternativ 3 – Randisolasjon under etasjeskiller. Ekstra innvendig isolasjon av fasader og randisolasjon under betongdekke i tak.
- Alternativ 4 – Ekstra innvendig isolasjon av fasader og randisolasjon under betongdekke i tak.

Alternativ 1 og 2 gir best resultat i form av reduksjon av varmetap og forbedring av byggets normaliserte kuldebroverdi. Begge disse alternativene medfører imidlertid store ekstrakostnader, og spesielt Alternativ 1 ligger svært langt fra å være fornuftig ut i fra et økonomisk perspektiv. Alternativ 3 og 4 gir liten og ingen reduksjon i kuldebroverdi over etasjeskillene, men likevel et samlet lavere varmetap grunnet ekstra isolasjon i fasader og randisolasjon under tak. Investeringskostnaden forbundet med disse to alternativene er forholdsvis lav, og reduksjon i årlig energiforbruk gir Alternativ 4 en tilbakebetalingstid på 38 år. Denne tilbakebetalingstiden er for lang til at alternativet kan klassifiseres som en god investering, men det ligger i samme størrelsesområde som utskiftning av vinduer, og vil kunne forsvares økonomisk på lang sikt.

Sett ut i fra et brukerperspektiv vil utbedring av kuldebroer ved etasjeskiller være meningsløst da endring i overflatetemperaturer knapt vil være merkbart. Byggets kuldebroer etter etterisolering og utskiftning av vinduer vil neppe virke sjenerende for lærere og elever. Brukere vil med andre ord kun oppleve de negative sidene ved utbedringene, slik som upraktiske nivåendringer av gulv og redusert himlingshøyde.

Basert på dette utpeker Alternativ 4 seg som den beste løsningen. Dette alternativet innebærer å ignorere kuldebroene forårsaket av etasjeskiller, men forbedrer kuldebroene ved de vertikale ribbene i bygget samt overgang til tak. Dette er kuldebroer som det er enkelt å gjøre noe med når det likevel skal utføres et stort rehabiliteringsarbeid i bygget, og det vil ha en merkbar innvirkning på transmisjonstap. Alternativet medfører ingen store negative konsekvenser for brukerne av skolebygget, og den normaliserte kuldebroverdien reduseres til 0,15 W/(mK).

5.2 Drøfting av resultater i forhold til metode

Som nevnt innledningsvis i oppgaven, er det svært vanskelig å trekke ut spesifikke verdier for varmetap ved termografering. Dette har blitt bekreftet etter utførelse, og har på mange måter vist seg enda vanskeligere enn først antatt. Konsekvensen av dette har vært at en større del av oppgaven har måtte baseres på beregnede verdier fra simuleringer i Therm. En fordel med termograferingen har imidlertid vært muligheten av å avdekke konstruksjonsfeil eller manglende isolasjon. Det er et velkjent problem ved renovering av eksisterende bygninger at tegningsgrunnlag ikke alltid stemmer overens med hvordan ting har blitt utført i praksis. Ved å benytte termografering i denne oppgaven, har det vært mulig å bekrefte at tegninger og utførelse ikke har vesentlige forskjeller med tanke på byggets varmetap. Det er ikke avdekket konstruksjonsfeil, og med unntak av overgangen mellom den eksisterende første etasjen og påbygget, som i dag utgjør 2. 3. og 4. etasje i hovedblokken, har ikke termograferingen gitt noen uventede resultater. Dette er med på å validere de eksisterende byggetegningene og minske usikkerhet rundt videre beregninger.

Beregning av kuldebroverdier basert på simuleringer i Therm medfører flere feilkilder, men har fordelen av å kunne gi bestemte kvantitative verdier på kuldebroer. Dette er hovedårsaken til at det har vært praktisk å benytte Therm i så stor grad gjennom hele arbeidet med denne oppgaven. Som vist i vedlegg D, har beregning av U-verdier vært utført både manuelt og ved hjelp av Therm. Dette har gitt eksakt samme resultat for alle byggets plane flater og har fungert som egenkontroll ved beregninger. For geometriske detaljer er imidlertid nøyaktigheten av oppgitte verdier basert på den elementinndelingen programmet foretar ved simulering. Nøyaktigheten av beregningen oppgis av Therm sammen med den aktuelle U-verdien, og ved å benytte feilmarginene for alle simuleringene har det vært mulig å skape et "best case" og "worst case" scenario for bygget basert på elementinndeling. Samlet for alle kuldebroer utgjør denne forskjellen et betydelig størrelsesområde, og det har vært mulig å fastslå at byggets normaliserte kuldebroverdi i dag ligger et sted mellom 0,17 og 0,37 W/(m²K) med den beregnede verdien 0,27 W/(m²K). Det største usikkerhetsmomentet ved å benytte Therm er imidlertid ikke grunnet den oppgitte feilmarginen. Dette vil heller skyldes feil i inndata som følge av at tegningsgrunnlaget ikke er korrekt, gal tolkning av tegninger eller manglende informasjon. Spesielt kuldebroverdier og U-verdier rundt byggets mange vinduer er usikre da det foreligger svært lite informasjon i dokumentgrunnlaget rundt dette temaet. Alle beregninger i forbindelse med dette har derfor vært basert på erfaringer og anbefalinger fra intern og ekstern veileder,

samt fra Inger Andresen som har gjort energiberegninger på Gand Videregående Skole for Link Arkitektur, og som har professor II stilling ved NTNU der hun underviser i temaet energieffektive bygninger. Konduktiviteten til ulike byggematerialer har også stor innvirkning på de beregnede resultatene. Disse er funnet SINTEF Byggforsk sine tabeller og i samarbeid med ekstern veileder.

Som beskrevet i kapittel 4.1, var ikke resultatene fra termograferingen og de beregnede verdiene fra Therm konsekvente for alle byggets kuldebroverdier. Mest sannsynlig kommer dette av forstyrrende faktorer under termograferingen, som for eksempel vind. Det var likevel ingen dramatiske forskjeller mellom de to metodene, og de beregnede verdiene er vurdert til å være brukbare.

Når det kommet til de forslagene som er gitt for utbedring av byggets kuldebroer, er disse basert på at bygget oppdateres til "TEK 10 standard". Dette er et forslag som er gitt ved energiberegningene av bygget i forprosjektet for oppgraderingen av skolen. Det er ikke bestemt om disse tiltakene skal gjennomføres, men som student er dette en forutsetning som er gjort i forbindelse med denne oppgaven. Årsaken til denne forutsetningen er at den gir et konkret holdepunkt med hensyn til hvordan byggets standard kan forventes å være etter rehabilitering uten ekstra kuldebroerreduserende tiltak. Per i dag har bygningskallet en isolasjonstykkelse på maks 5 cm, hvilket gir høye U-verdier og gjør etterisolering og utskiftning av vinduer til førsteprioritet ved energibesparende tiltak. Det er med andre ord lite hensiktsmessig å diskutere et snevert tema som utbedring av kuldebroer i et bygg med så stort varmetap fra flater som fasade og tak.

Vurdering av forslagene til kuldebroerreduserende tiltak er gjort innen de tre kategoriene varmetap, økonomi og brukers opplevelse av bygget. Varmetap er beregnet på samme måte som tidligere i oppgaven ved hjelp av Therm, Simien og Excel. Økonomiske beregninger er gjort på et overordnet nivå ved grove estimater av kostnader, og beregning av tilbakebetalingstid på investeringen. Disse beregningene er ment til å gi et bilde over størrelsen på kostnaden forbundet med de ulike alternativene og gir ikke et detaljert innsyn i det økonomiske aspektet ved en slik investering. Årsaken til at det ikke er valgt å gjøre dette mer nøyaktig, er min manglende erfaring med bruk av økonomiske modeller, og spesifikke kostnader ved prosjekter som dette. Hvor stor den reelle ekstrakostnaden forbundet med hvert av de kuldebroerreduserende tiltakene vil være, er også svært avhengig av hvor mye av den innvendige

konstruksjonen og de tekniske installasjonene som beholdes. Vurdering av brukers opplevelse av bygget før og etter eventuelle kuldebroereduserende tiltak er basert på skjønn. Dette innebærer en subjektiv tolkning av hvordan bygget vil fungere i praksis ved etterisolering på utvalgte steder, samt hvilke temperaturdifferanser som kan oppleves som sjenerende. Den endelige konklusjonen er basert på innhentede data om byggets varmetapssituasjon i dag, utførte beregninger og vurderinger som er gjort i disse tre kategoriene.

5.3 Konklusjon

Oppgaven tar utgangspunkt i at det er planlagt en omfattende oppgradering av Gand Videregående Skole. Store deler av bygningsmassen skal rives og gjenoppbygges fra grunnen. Rogaland Fylkeskommune ønsker imidlertid å beholde skolens hovedbygg fra 1968 da dette ansees som en viktig del av Sandnes' arkitekturhistorie. I forbindelse med dette oppstår utfordringer ved å tilfredsstille dagens krav til energiforbruk. En del av denne utfordringen består av å redusere byggets kuldebroer.

I foregående kapitler er hovedbyggets varmetap studert gjennom termografering og simuleringer i Therm og Simien; Resultatene av dette har videre blitt drøftet. Oppsummert er det mulig å fastslå at en betydelig del av byggets varmetap er forårsaket av kuldebroer. Den beregnede normaliserte kuldebroverdien for bygget er $0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, hvilket er svært høyt sammenlignet med normtallet fra NS3031:2010 på $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Ved etterisolering vil byggets kuldebroer påvirkes. De fleste kuldebroverdiene vil bli mindre da et ekstra isolasjonslag er med på å pakke inn den aktuelle detaljen og redusere varmetap her, så vel som for resten av flaten. Gjennomgående betongelementer som etasjeskiller vil imidlertid ikke dra nytte av et ekstra lag med innvendig isolasjon, og kuldebroverdien her vil øke.

Utbedring av kuldebroer forårsaket av etasjeskiller har vist seg å være vanskelig uten å forringe fasadens utseende. Ekstra isolering av skillets under- og overside er en mulig løsning, men vil føre til fortsatt høye kuldebroverdier målt etter dagens standard. I tillegg er dette tiltak som vil stjele rom fra undervisningslokaler og tekniske installasjoner, og som vanskelig kan forsvares ut fra et økonomisk synspunkt. For hovedbygget på Gand videregående Skole anbefales det derfor å redusere de kuldebroene som er lett tilgjengelige ved ekstra isolering, slik som overgang mellom ribbe og vegg og overgang mellom fasade og tak. Det er derimot ikke hensiktsmessig å utbedre kuldebroer forårsaket av etasjeskiller.

Generelt viser denne oppgaven at kuldebroer kan utgjøre en betydelig del av et byggs totale varmetap. Tidkrevende beregninger fører likevel til at det ofte benyttes kuldebrotabeller eller normtall ved energiberegninger. Dette er metoder som hovedsakelig er utviklet med tanke på nyere bygninger og kan gi et svært feilaktig bilde for eldre konstruksjoner. Den normaliserte kuldebroverdien vil også variere mye avhengig av byggets konstruksjonsprinsipp og størrelse. Det er derfor behov for å utvikle mer varierte kuldebrotabeller slik at hver enkelt kuldebro i en bygning raskt kan slås opp.

Referanser

- Anda, P. (2012, 5. januar). *NVE-bygget/Middelthunsgate 29, Rehabiliterte fredet kontorbygg til miljøforbilde*. Hentet 17. april 2012 fra <http://www.arkitektur.no/?nid=228527&lcid=1044&pid0=87483&measuretype=209243&pid2=84682>
- Andresen, I. (2012, 5. april). *RE: Energiberegninger for Gand Videregående Skole*. (Personlig e-post fra Inger Andresen, professor II ved NTNU, til Berg, I. S.).
- Birkeli, O. (1968, 26. juni). *RE: Rogaland Fylke: Sandnes Yrkesskole*. (Brev fra rådgivende ingeniør i bygningsteknikk, Ottar Birkeli, til bygningssjefen i Sandnes).
- Byggteknisk forskrift. (2011). *Veiledning til forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK 10)* Norsk Byggtjenestes Forlag.
- Çengel, Y. A. & Boles, M. A. (2007). *Thermodynamics - An Engineering Approach Sixth Edition*, New York: Mc Graw-Hill.
- Eliassen, A. (2012). *Datosøk Sandnes (Rogaland)*. Hentet 20. april 2012 fra <http://www.yr.no/sted/Norge/Rogaland/Sandnes/Sandnes/almanakk.html?dato=2012-01-25>
- Enova (2012). *Potensial- og barrierestudie. Energieffektivisering i norske bygg*. Trondheim.
- Enova anbefaler (2010). *Etterisolere utvendig, Etterisolere innvendig og Etterisolering ved innblåsing*. Hentet 15. mars 2012 fra <http://www.enovaanbefaler.no/sitepageview.aspx?sitePageID=1555>
- Espedal, K. J. (2005). *Bygningsfysik*, Lillestrøm: Byggenæringens Forlag AS.
- Finlayson, E., Mitchell, R., Arasteh, D., Huizenga, C. & Curcija, D. (1998). *Program Description - THERM 2.0 - for Analyzing Two-Dimensional Heat Transfer Through Building Products*. Hentet 8. April 2012 fra <http://windows.lbl.gov/software/therm/21a/Therm2.pdf>
- Fluke (u.å.). *Fluke Ti25 termokamera*. Hentet 24. april 2012 fra <http://www.fluke.com/fluke/nono/Thermal-Imaging/Ti25.htm?PID=56723>
- Gand Videregående Skole. (2011a). *Om skolen*. Hentet 16. april 2012 fra <http://www.gand.vgs.no/index.php/om-skolen>
- Gand Videregående Skole. (2011b). *Undervisningstilbud på Gand*. Hentet 16. april 2012 fra <http://www.gand.vgs.no/index.php/skolens-tilbud>
- Grimnes, K. (2012, 9. mai). *RE: Talking av varmebilder*. (Personlig e-post fra Karl Grimnes, lisensiert kursleder ved Infrared Training Centre, til Berg, I. S.).
- Gustavsen, A., Thue, J. V., Blom, P., Dalehaug, A., Aurlien, T., Grynning, S. & Uvsløkk, S. (2008). *Kuldebroer - Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*. Oslo: SINTEF Byggforsk
- Haase, M. & Wigenstad, T. (2010). *Evaluering av bruk av dobbel fasade som konsept ved oppgradering av eksisterende fasade*. Trondheim: SINTEF Byggforsk
- Harket, H. T. (2011, 8. september). *Verneverdig bygg med lavt energibruk*. Norges vassdrags- og energidirektorat. Hentet 17. april 2012 fra <http://www.nve.no/no/Nyhetsarkiv-/Pressemeldinger/Verneverdig-bygg-med-lavt-energibruk/>

- Highfield, D. (2000). *Refurbishment and Upgrading of Buildings*. London: E & Fn Spon.
- Infrared Training Centre (2007). *Termografi nivå 1 Kursmanual*. Oslo: Precision Technic Nordic.
- Jakobsen, S. E. (2002). God arkitektur gir lærelyst. *Forskning.no*. Hentet 8. juni 2012 fra <http://www.forskning.no/artikler/2002/desember/1039092029.37>
- Kilen, R. (2012, 12. januar). *RE: Innetemperatur - Gand Videregående Skole*. (Personlig e-post fra Rine Kilen, driftsleder ved Gand vgs., til Berg, I. S.).
- Kilnes, C. (2010, 2. august). Ny fasade for Folkets hus. *Adressavisen*. Hentet 17. april 2012 fra <http://www.adressa.no/kultur/article1512438.ece>
- Norsk forening for varme-, ventilasjon og sanitærteknikk (1984). *Beregning av bygningers varmebehov*, Norsk VVS Teknisk Forening.
- NS-EN 13187:1998. *Bygningers termiske egenskaper - Kvalitativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjerm - Infrarød metode - (ISO 6781:1983 modifisert)*. Standard Norge.
- NS-EN ISO13943:2010. *Brannsikkerhet - Terminologi*. Lysaker: Standard Norge.
- NS-EN ISO 6946:2007. *Bygningskomponenter og -elementer -Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisienter -Beregningsmetode*. Standard Norge.
- NS-EN ISO 10211:2007. *Kuldebroer i bygningskonstruksjoner - Varmestrømmer og overflatertemperaturer - Detaljerte beregninger*. Standard Norge
- NS 3031:2010. *Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data*. Lysaker: Standard Norge.
- NS 3940:2012. *Areal- og volumberegninger av bygninger*. Lysaker: Standard Norge.
- Reed, E. K. (1968, 5. juli). *Forespørsel ved betongsøyler med tverrsnitt 200 x 150 mm som bærende søyler*. Sandnes Yrkesskole. Oslo (Brev fra Det kongelige kommunal- og arbeidsdepartement, ved Erling Kr. Reed, til Ottar Birkeli, rådgivende ingeniør i bygningsteknikk)
- Rogaland Fylkeskommune (2011, 26. oktober). *Gand Videregående Skole, Forprosjekt*. Stavanger.
- Rønnevik, J. M. (2012, 3. januar). *Veiledning* (Personlig samtale mellom Jorunn Merete Rønnevik og Berg, I. S.).
- SINTEF Byggforsk (2008). *Kuldebroer - Konsekvenser og dokumentasjon av energibehov (Byggforskserien 471.015)*. Blindern.
- STANZA (u.å.). *Public domain responsive architecure facade by Stanza, The AOF Nova facade Trondheim Norway*. London. Hentet 17. april 2012 fra <http://www.stanza.co.uk/facade/stanza.html>
- Sørby, H. & Paavola, M. (2011). *Sandnesarkitektur*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Teknisk Ukeblad (u.å.). *Hvor mye energi?* Hentet 18. mai 2012 fra <http://energilink.tu.no/no/energikalkulator.aspx>
- Teletlas (2011). *Sandnes*: Google Maps. Hentet 4. april 2012 fra <http://maps.google.no/maps?hl=no&ll=58.846416,5.737492&spn=0.002648,0.008256&t=h&z=18>
- Tonning, E. (1968, 1. februar). *RE: Søknad om byggetillatelse*. (Søknad fra arkitekt Eilif Tonning til Bygningssjefen i Sandnes)
- Tungesvik, O. I. (2012, 8. mars). *Veiledning*. (Personlig samtale mellom Odd Inge Tungesvik, branningeniør, og Berg, I. S.).

Vedlegg

Vedlegg A - Prøvekrav ved termografering i Skandinavia (utkast fra NS-EN 13187:1998)

Vedlegg B - Spesifikasjoner for Fluke Ti25 (utkast fra online brukerhåndbok (FLUKE))

Vedlegg C - Varmebilder fra Gand Videregående Skole 26. januar 2012

Vedlegg D - U-verdier (Beregnet manuelt og i Therm)

Vedlegg E - Kuldebroverdier (Beregnet fra U-verdier samt modeller i Therm)

Vedlegg F - Oversikt over dimensjoner med tilhørende effekttap ved $\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Vedlegg G - Detaljer modellert i Therm (Materialer, temperaturfordeling og flukstetthet)

Vedlegg H - Energibudsjett og varmetapstall (Beregnet i Simien)

Tillegg D (informativt) Eksempel på et sett med prøvingskrav

Prøvingskravene i dette tillegget er tilpasset de spesielle klimaforholdene og bygningsteknologien i Skandinavia. Spesielle nasjonale forhold kan berettigge andre sett med prøvingskrav i andre regioner.

For skandinaviske forhold skal følgende prøvingskrav sikre tilnærmet stasjonære forhold for en lett bygningskonstruksjon⁴⁾ når termograferingen utføres fra innsiden.

- Minst 24 h før termograferingen skal utetemperaturen ikke avvike mer enn ± 10 °C fra temperaturen ved begynnelsen av termograferingen;
For tunge konstruksjoner med stor termisk masse skal det tas spesielt hensyn til varmelagringseffekter.
- Minst 24 h før termograferingen og så lenge den pågår, skal lufttemperaturdifferansen over klimaskjermen ikke være mindre enn den numeriske verdien på $3/U$, der U er den teoretiske verdien for bygningsdelens varmegjennomgangskoeffisient i $W/(m^2 \cdot K)$, men aldri under 5 °C;
- Minst 12 h før termograferingen og så lenge den pågår, bør overflatene til klimaskjermen som termograferes, ikke utsettes for direkte solstråling;
- Under termograferingen skal lufttemperaturen ute ikke avvike med mer enn ± 5 °C, og lufttemperaturen inne ikke med mer enn ± 2 °C fra deres respektive verdier ved begynnelsen av termograferingen. Virkningene av temperaturendringer under termograferingen kan kontrolleres ved å overlappes den siste skanningen med den opprinnelige skanningen. Hvis endringen er mindre enn 1 °C eller 2 °C, bør prøvingskravene anses å være oppfylt.

Hvis målesystemet for IR-stråling har en minste oppløsning på 0,3 °C, innebærer dette settet med prøvingskrav følgende: ved en innvendig overflatemotstand $R_{si} = 0,10$ $m^2 \cdot K/W$ kan en endring i U -verdien på 50 % oppdages. Med en innvendig overflatemotstand $R_{si} = 0,20$ $m^2 \cdot K/W$ kan en endring i U -verdien på 25 % oppdages.

Hvis termograferingen utføres på tross av avvikene fra disse prøvingskravene, bør man huske på dette ved termograferingen og bedømmelsen av resultatene, og det bør angis i termograferingsrapporten.

⁴⁾ Tiden det tar å nå tilnærmede stasjonære forhold varierer, avhengig av egenskapene til bygningens klimaskjerm. For en tung murkonstruksjon kan det ta flere dager. Alternativt kan det være en fordel å utføre en undersøkelse under ikke-stasjonære forhold.

Spesifikasjoner

Temperatur

Temperaturmåleområde (ikke kalibrert under -10 °C)	-20 til +350 °C (to områder)
Nøyaktighet	± 2 °C eller 2 % (etter hvilken som er størst)
Emissivitetskorrigering på skjerm	Ja

Kameraytelse

Synsfelt	23° x 17°
Romopløsning (IFOV)	2,5 mrad
Min. fokuseringsavstand	<ul style="list-style-type: none"> • Termisk linse: 15 cm • Synlig/visuell linse: 46 cm
Fokus	Manuell
Bildefrekvens	9 Hz oppdateringshastighet
Detektortype	160 x 120 FPA (Focal Plane Array), ukjølt mikrobolometer
Infrarød linsetype	20 mm F = 0,8 linse
Termisk sensitivitet (NETD)	≤ 0,1 °C ved 30 °C (100 mK)
Infrarødt spektralbånd	7,5 µm til 14 µm
Visuelt kamera	640 x 480 oppløsning

Bildepresentasjon

Paletter	Ironbow (jernbue), blue-red (blå-rød), high contrast (høy kontrast), amber (gul), hot metal (varmt metall), grey (grå)
Nivå og skala	Jevn automatisk skalering og manuell skalering av nivå og skala
Minimum skala (i manuell modus)	2.5 °C
Minimum skala (i automodus)	5 °C
IR-Fusion®-informasjon	Fullstendig infrarød med automatisk blending MAKS, MID eller MIN, og bilde-i-bilde med automatisk blending MAKS, MID eller MIN (visuell- og IR-blending)

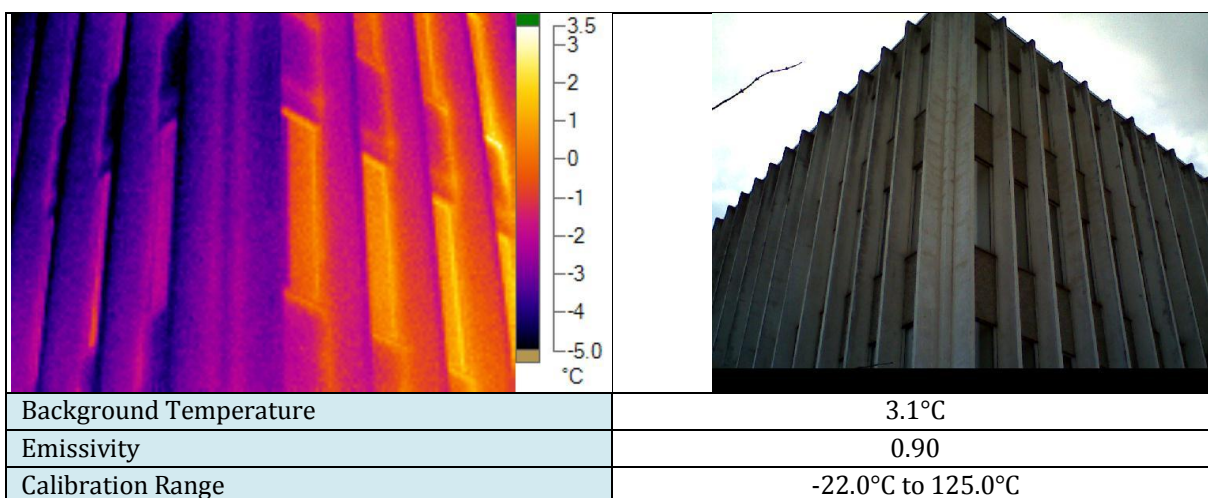
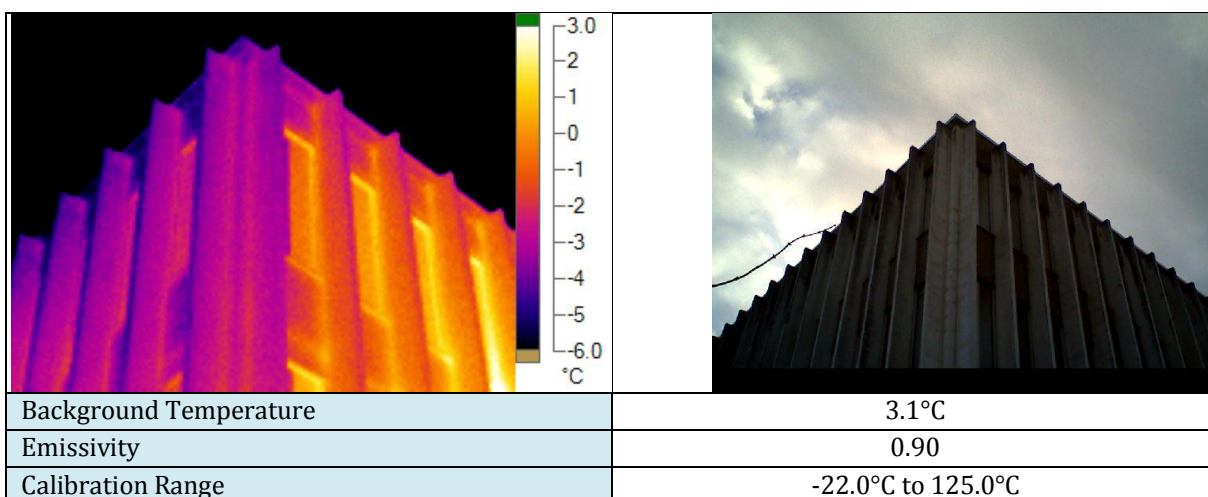
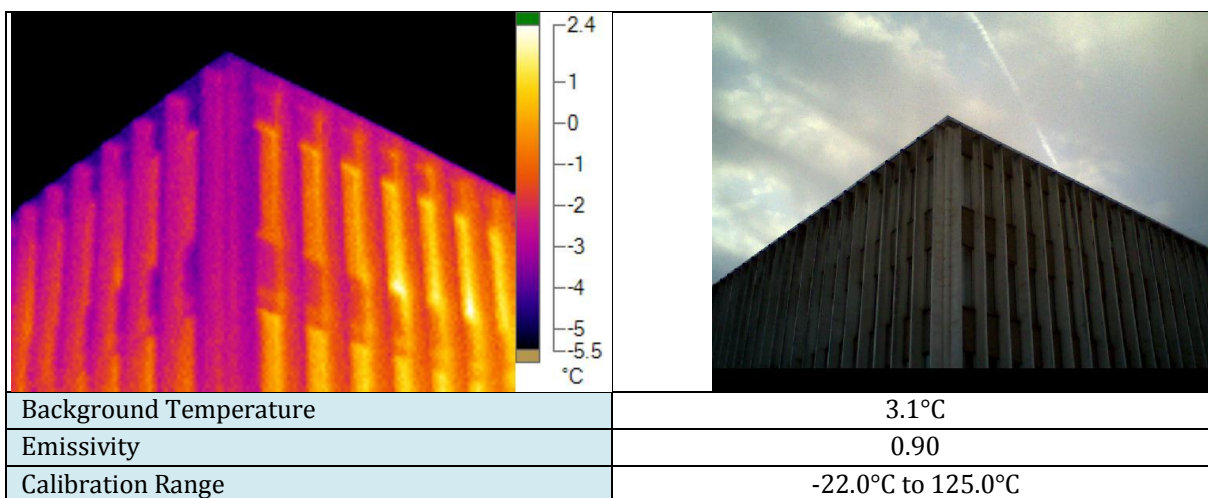
Vedlegg B
Spesifikasjoner for Fluke Ti25
 (utkast fra online brukerhåndbok (FLUKE))

Bilde-i-bilde (PIP)	Tre nivåer med IR-blending vises midt på skjermen 320 x 240 piksler
Full skjerm (PIP av)	Tre nivåer med IR-blending vises midt på skjermen 640 x 480 LCD

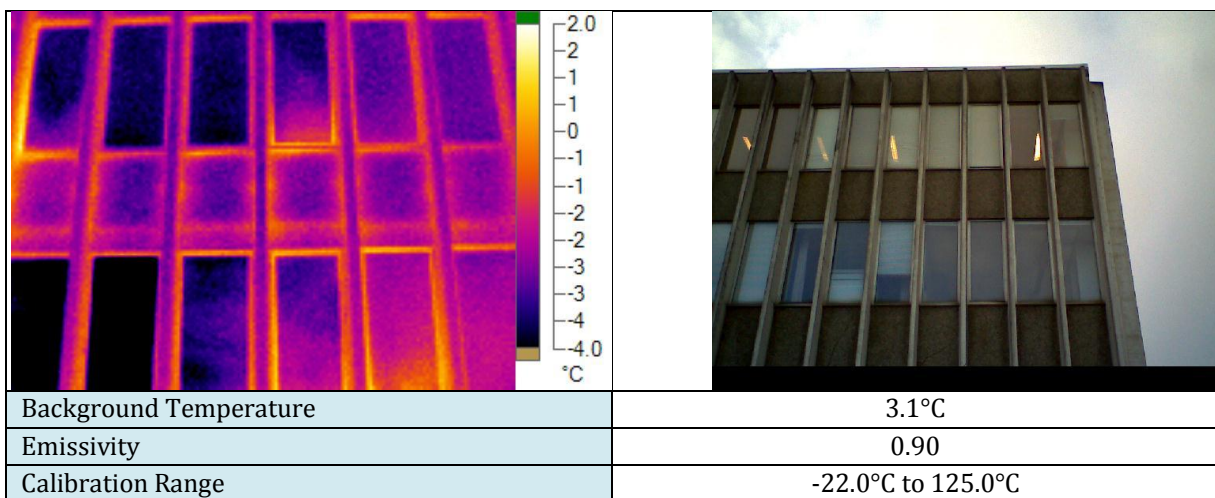
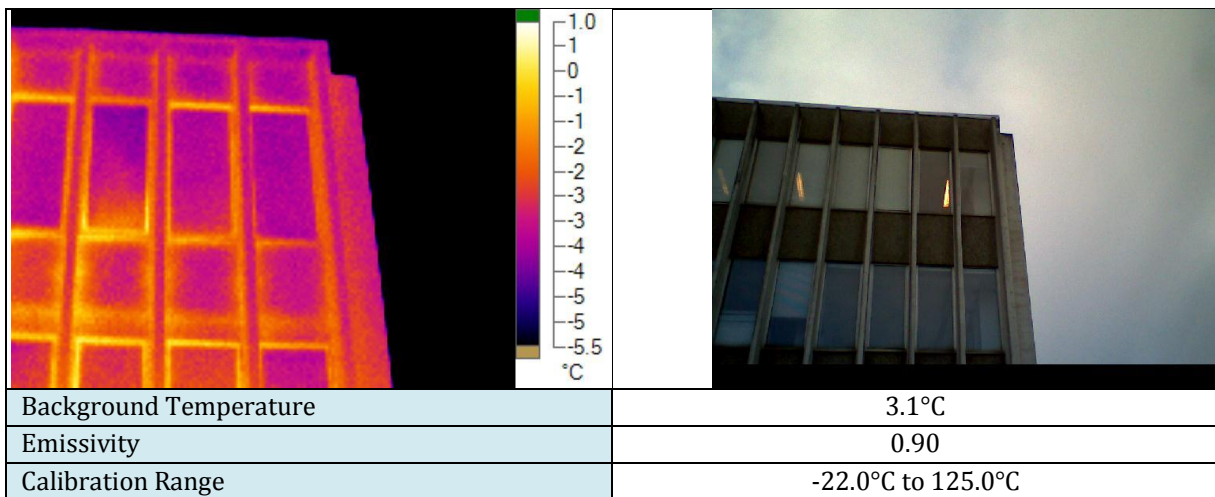
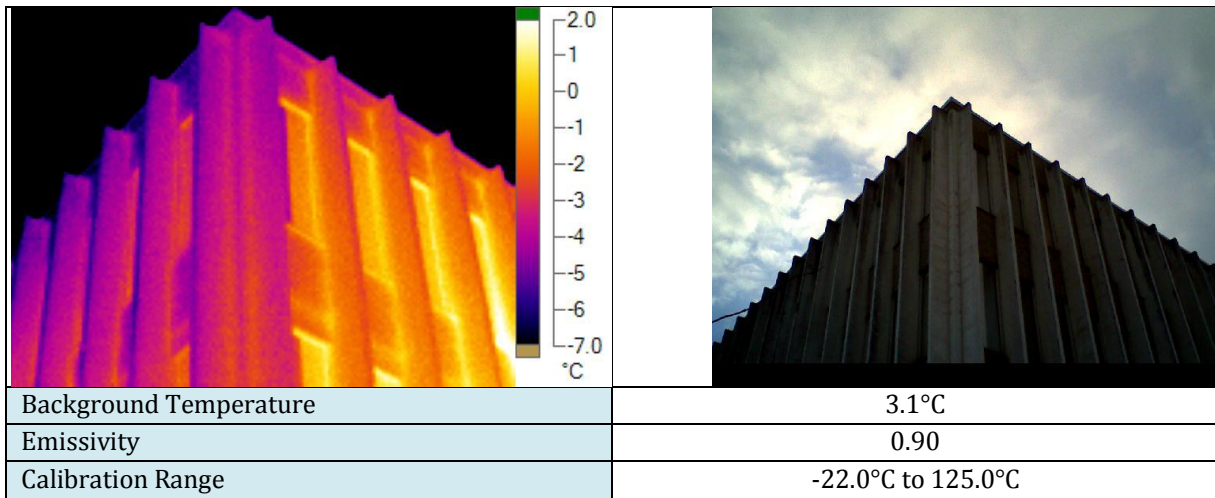
Taleannotering	
Taleannotering	Maks. registreringstid 60 sekunder per bilde
Lagringsmedium	SD-minnekort (2 GB-minnekort kan lagre minst 1200 fullstendig radiometriske (.is2) IR-bilder og tilhørende visuelle bilder, hver med 60 sekunders taleannotering eller 3000 enkle (.bmp) IR-bilder)
Filformater	Ikke-radiometrisk (.bmp) eller fullstendig radiometrisk (.is2) Programvare for analyse trengs ikke for filer som ikke er radiometriske (.bmp)
Eksportfilformater med SmartView™-	JPEG, BMP, GIF, PNG, TIFF, WMF, EXIF og EMF

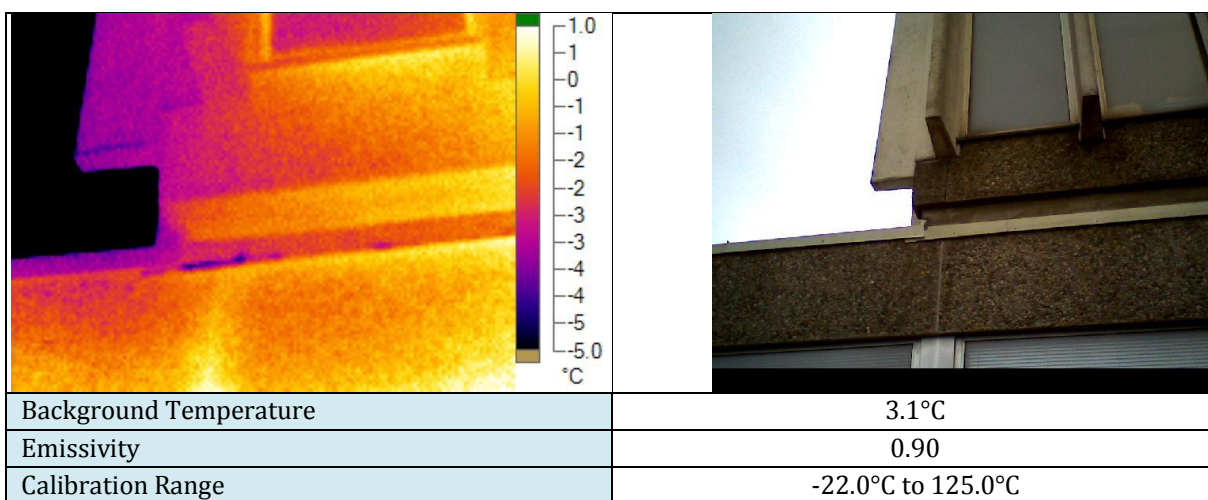
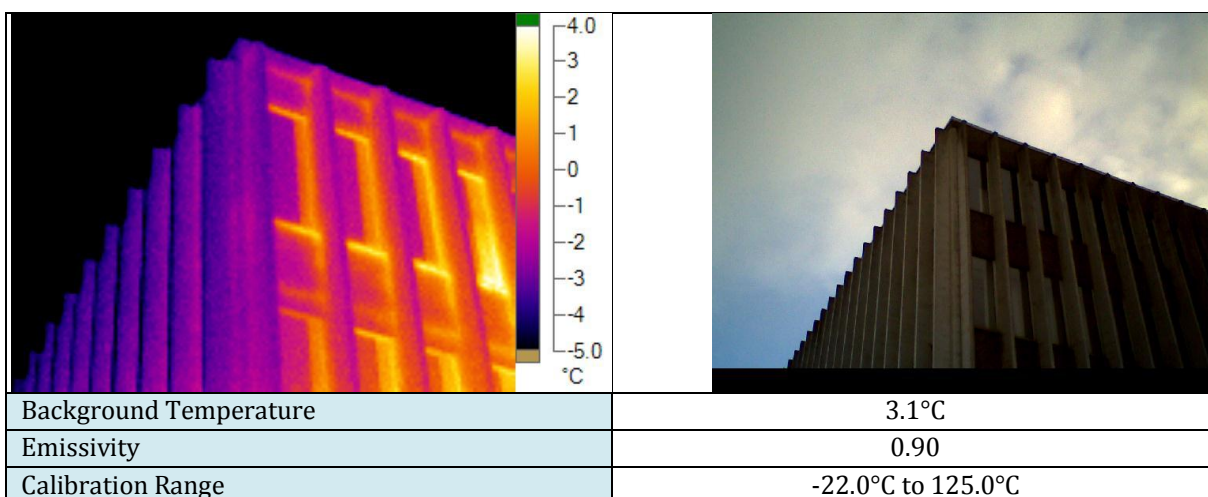
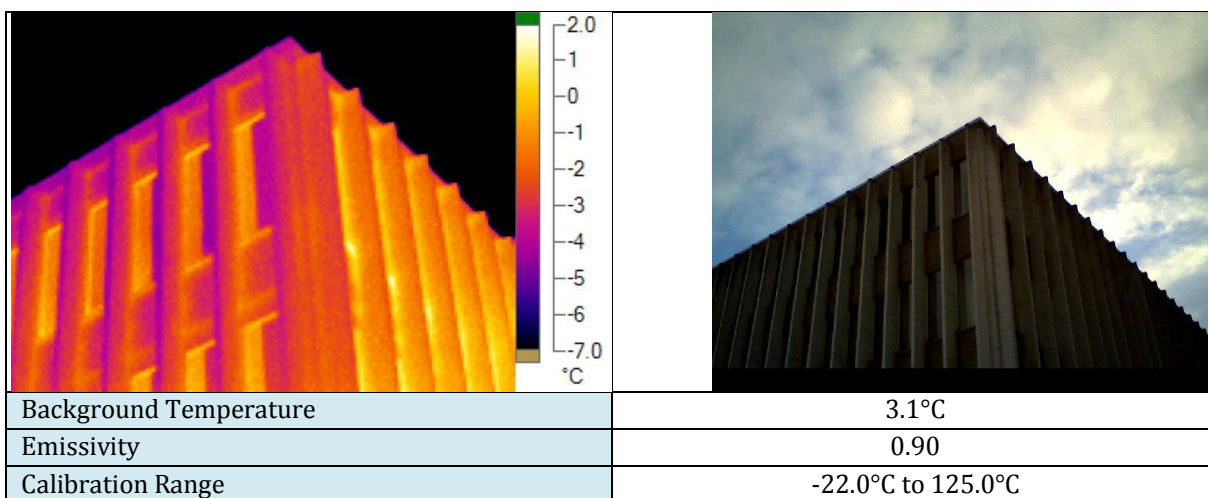
Generelle spesifikasjoner							
Temperatur	Drift: -10 til 50 °C Oppbevaring: -20 til 50 °C uten batterier						
Relativ fuktighet	10–90 % (ikke-kondenserende)						
Skjerm	9,1 cm VGA LCD-skjerm (640 x 480) i landskapsformat og farge, med bakgrunnsbelysning (skarp eller auto)						
Kontroller og	Temperaturskala som kan velges av brukeren (°C/°F)						
Programvare	SmartView™ analyse- og rapporteringsprogramvare følger med						
Strømforsyning	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 60%;">Batteri: Stille klokkeslett/dato</td> <td>Intern oppladbar batteripakke (følger med)</td> </tr> <tr> <td>Batterilevetid:</td> <td>Tre til fire timer kontinuerlig bruk (forutsatt 50 % LCD-lysstyrke)</td> </tr> <tr> <td>Batteriladetid ved bruk av vekselstrømsadapter/-lader og DC-billader:</td> <td>To timer fullstendig lading</td> </tr> </table>	Batteri: Stille klokkeslett/dato	Intern oppladbar batteripakke (følger med)	Batterilevetid:	Tre til fire timer kontinuerlig bruk (forutsatt 50 % LCD-lysstyrke)	Batteriladetid ved bruk av vekselstrømsadapter/-lader og DC-billader:	To timer fullstendig lading
Batteri: Stille klokkeslett/dato	Intern oppladbar batteripakke (følger med)						
Batterilevetid:	Tre til fire timer kontinuerlig bruk (forutsatt 50 % LCD-lysstyrke)						
Batteriladetid ved bruk av vekselstrømsadapter/-lader og DC-billader:	To timer fullstendig lading						

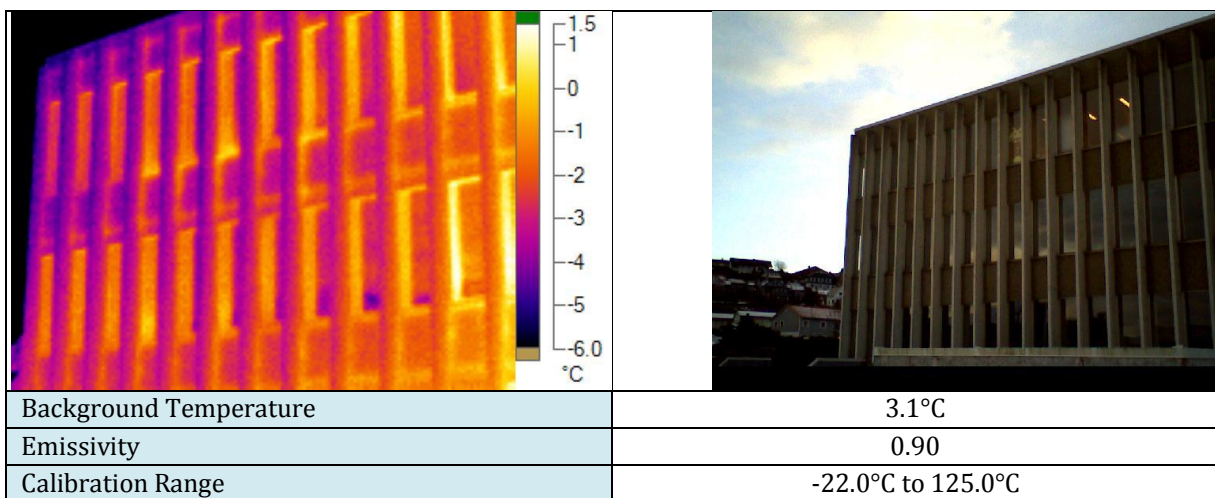
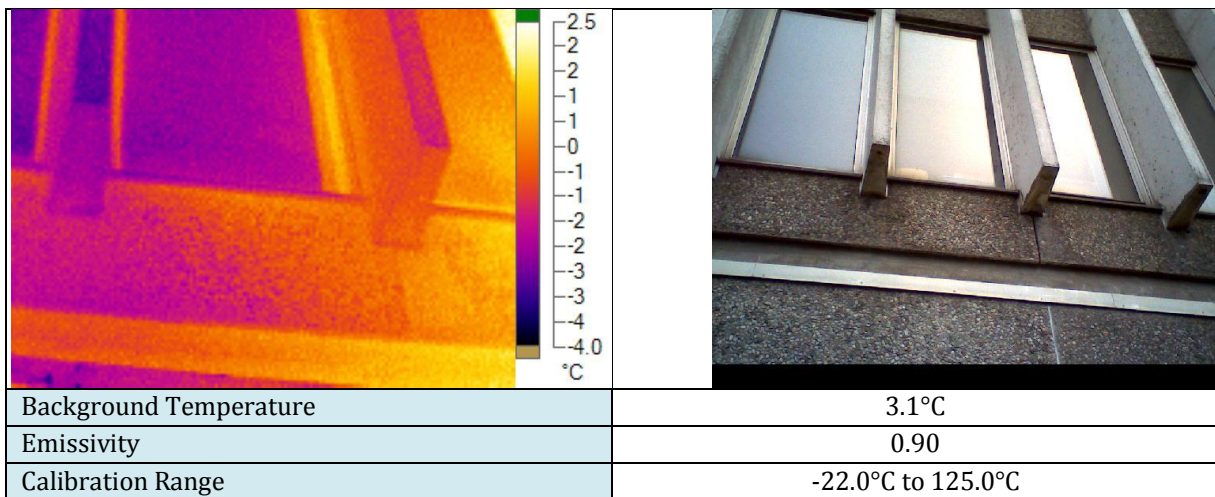
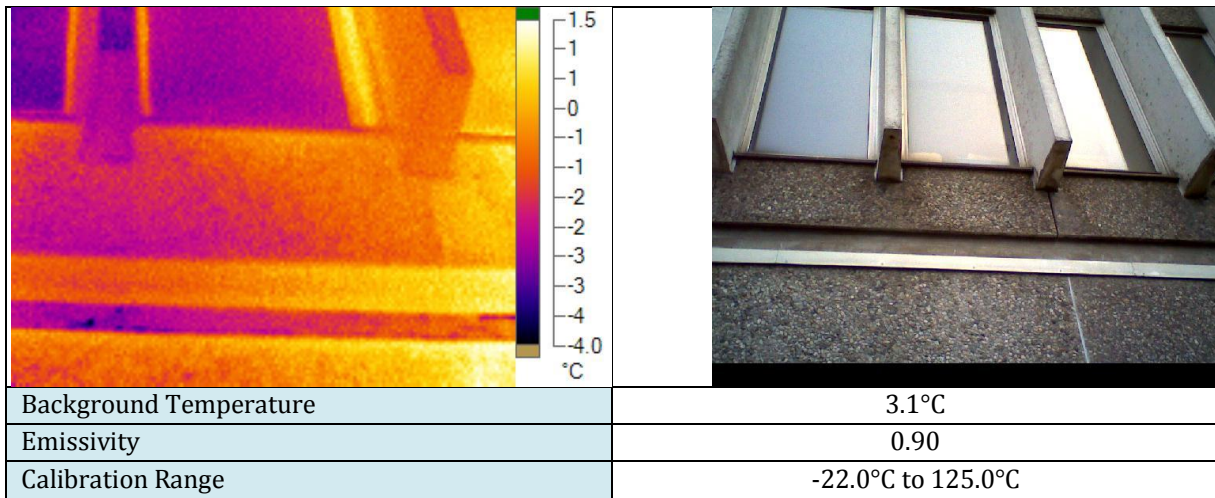
AC-drift/-lading	Vekselstrømsadapter/-lader (110–220 V AC, 50–60 Hz). Lader batteriet mens kameraet er i drift. Universelle AC-nettadaptore er inkludert.
Strømsparing	Hvilemodus aktivert etter 5 minutter uten aktivitet, automatisk avstenging etter 20 minutter uten aktivitet
Sikkerhetsstandarder	CE-direktiv: IEC/EN 61010-1 2. utgave forurensningsgrad 2
Elektromagnetisk kompatibilitet	EMC-direktiv: EN61326-1 C-merke: IEC/EN 61326 US FCC: CFR 47, del 15 klasse A
Vibrasjon	2 G, IEC 68-2-29
Støt	25 G, IEC 68-2-29 (2 m fall, 5 sider)
Mål (H x B x L)	0,27 x 0,13 x 0,15 m
Vekt	1,2 kg
IP-godkjenning	IP54
Garanti	To år
Kalibreringssyklus	To år (forutsatt normal drift og slitasje)
Språk som støttes	Engelsk, italiensk, tysk, spansk, fransk, russisk, portugisisk, svensk, tyrkisk, tsjekkisk, polsk, finsk, forenklet kinesisk, tradisjonell kinesisk, koreansk og japansk

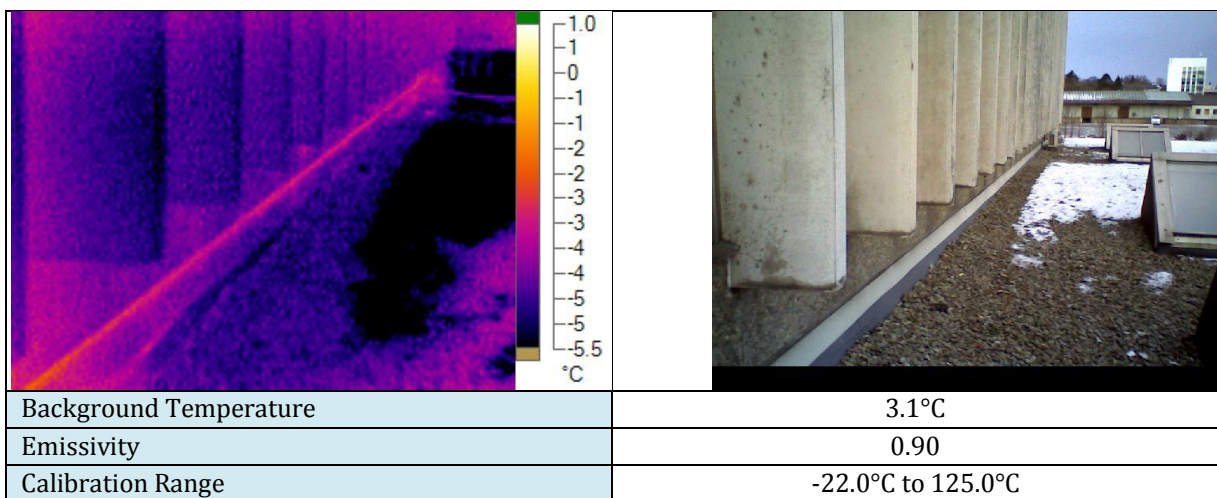
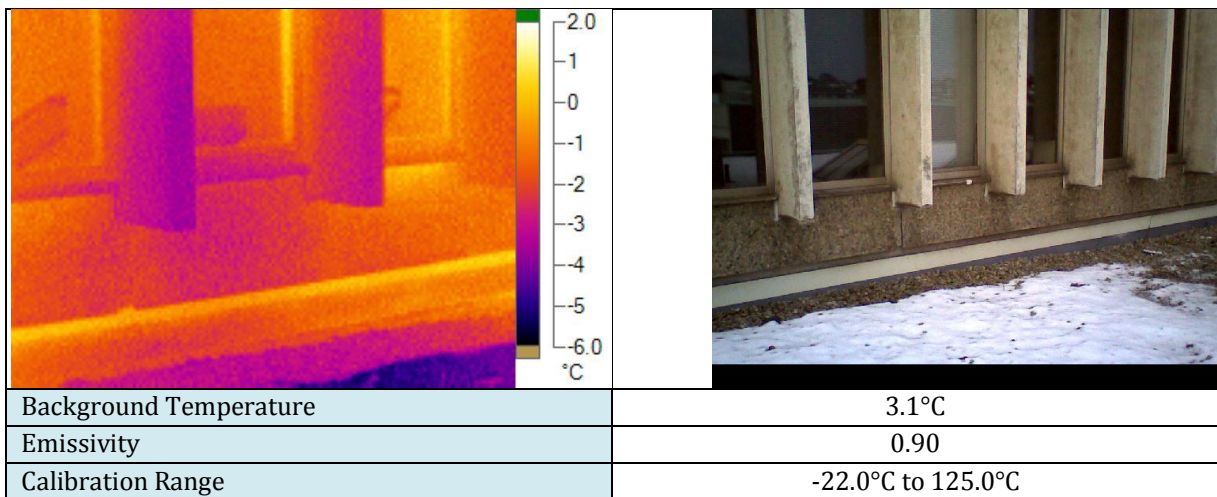
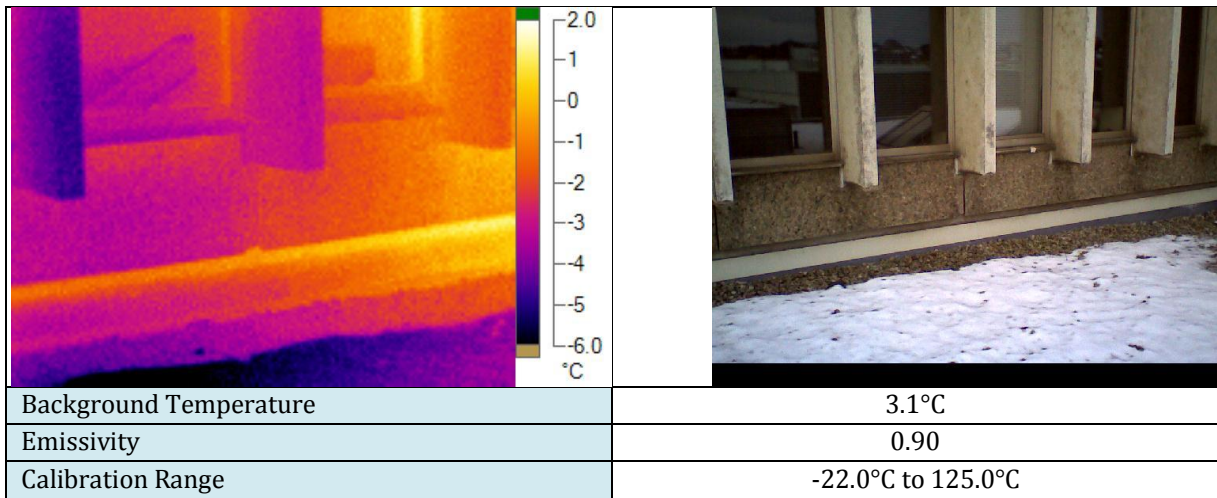


Vedlegg C
 Varmebilder fra Gand Videregående Skole
 26. januar 2012

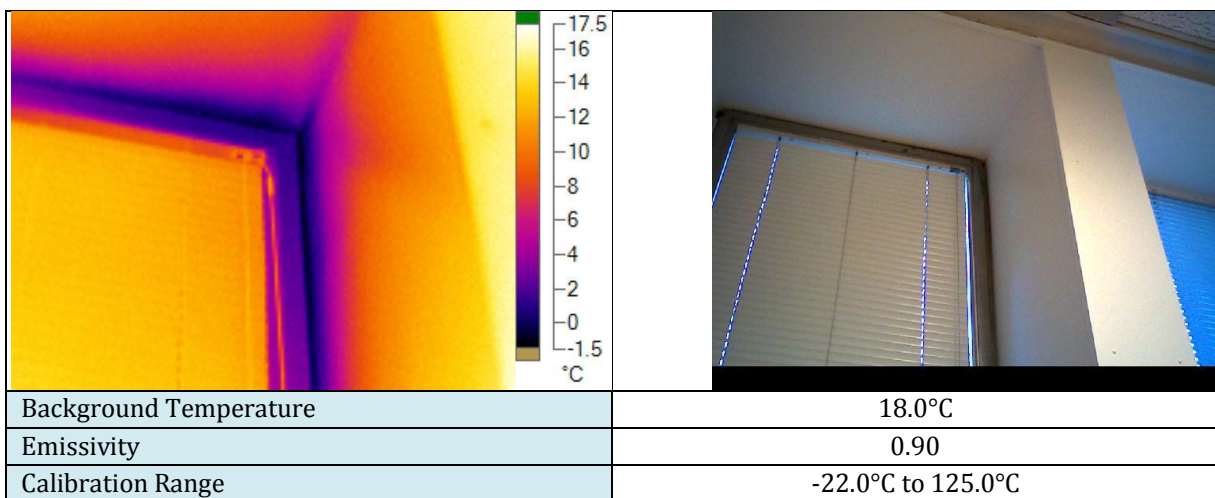
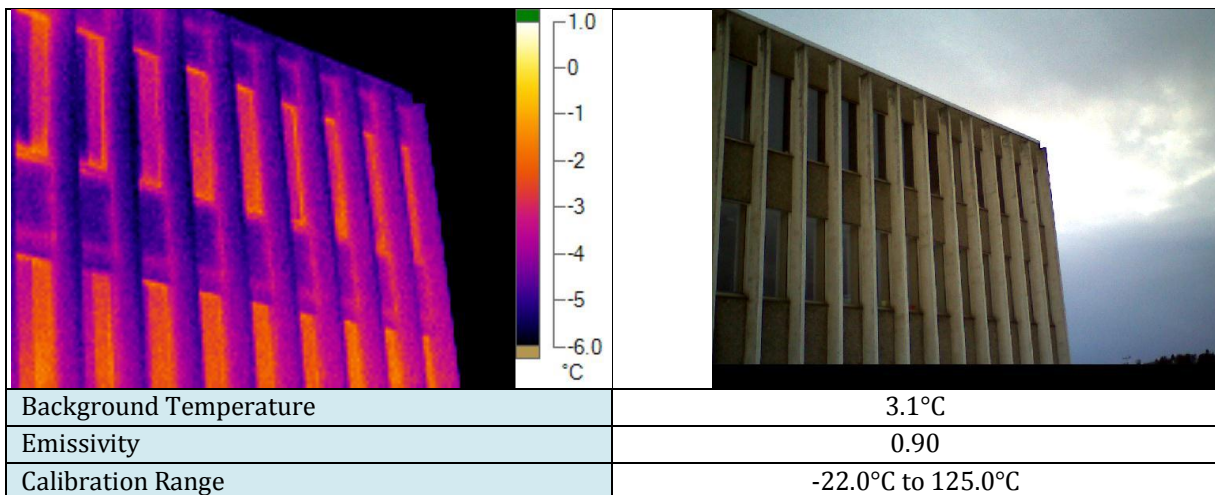
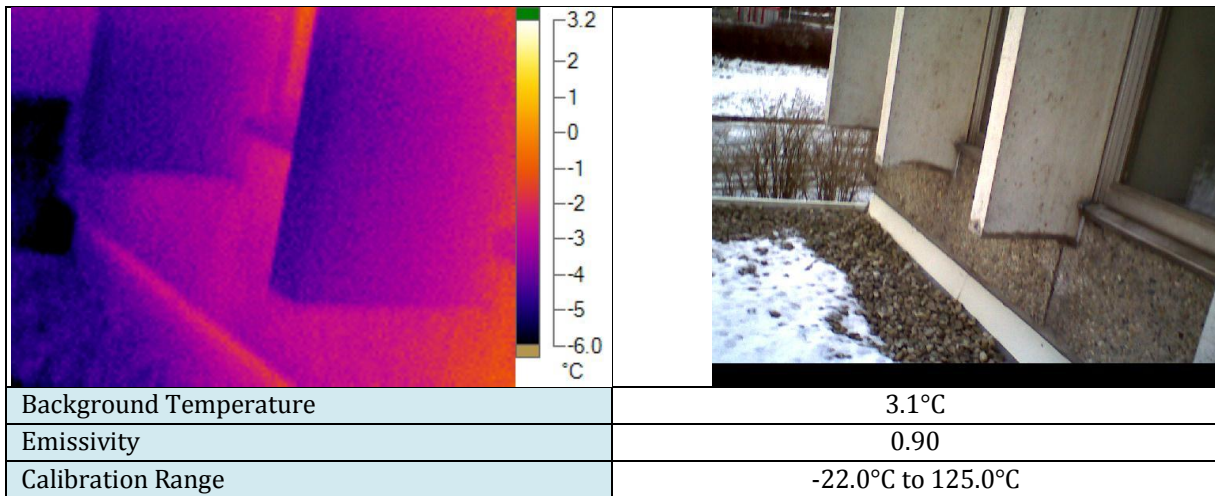


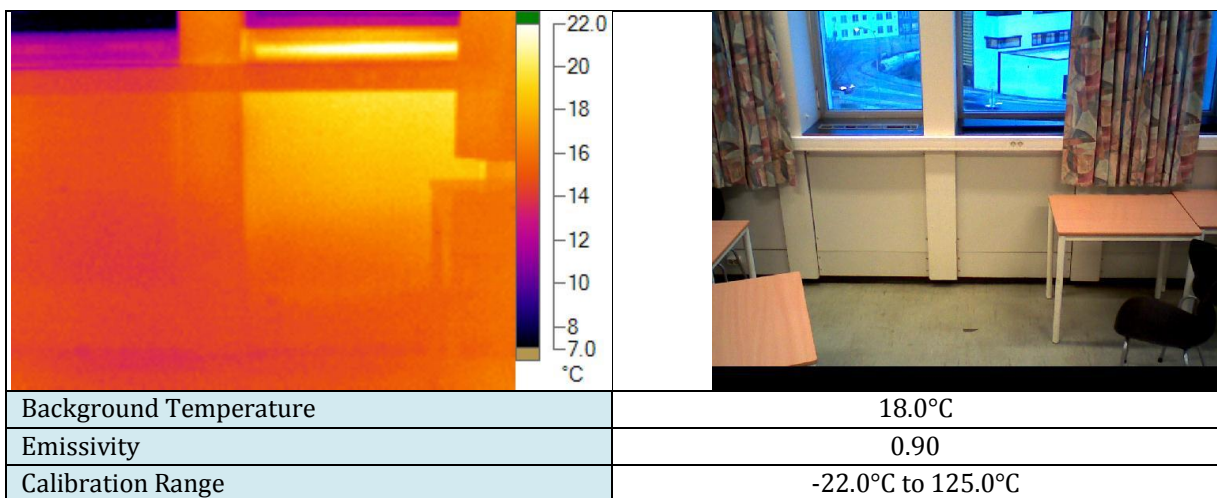
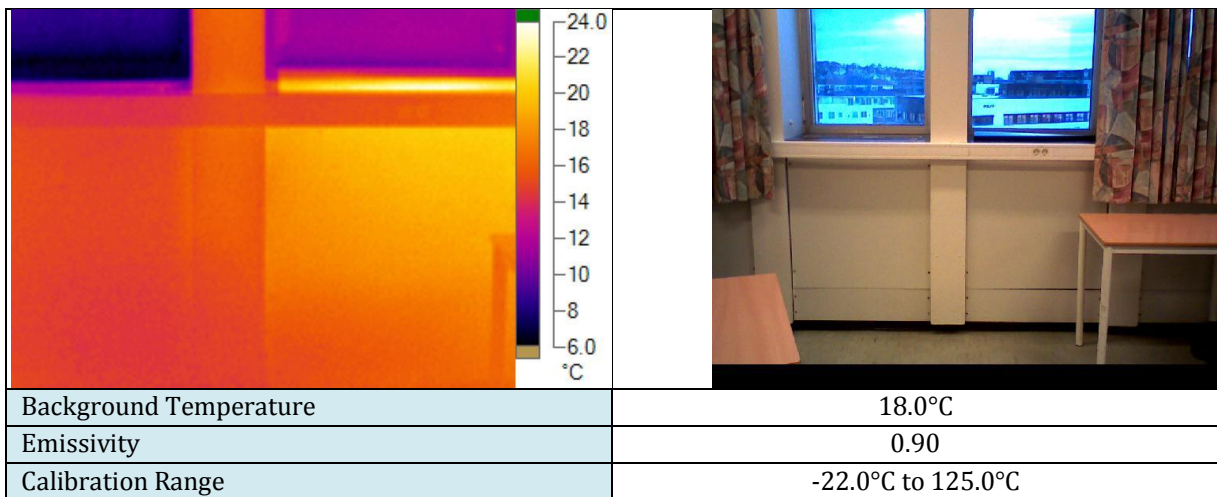
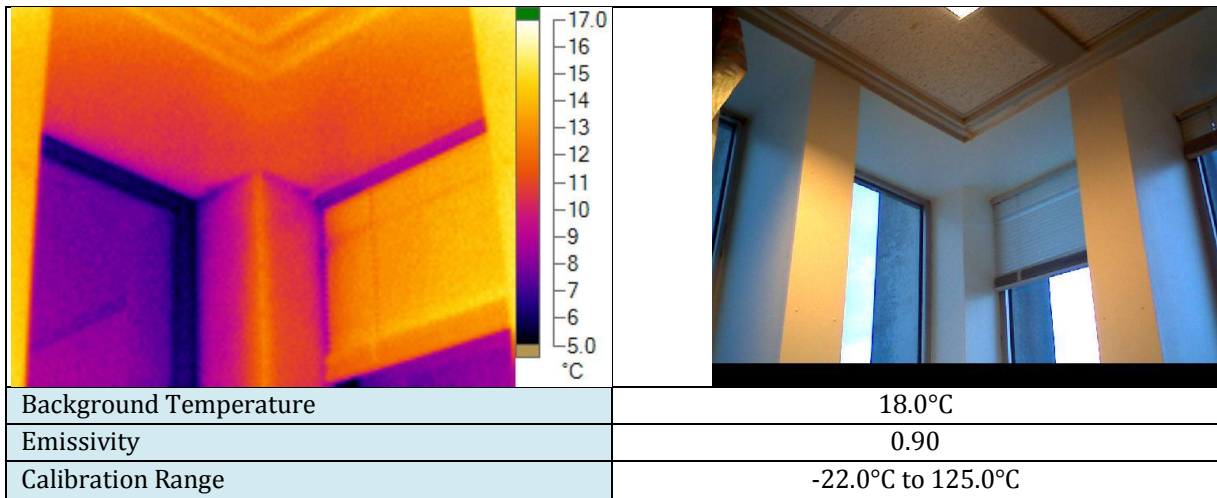




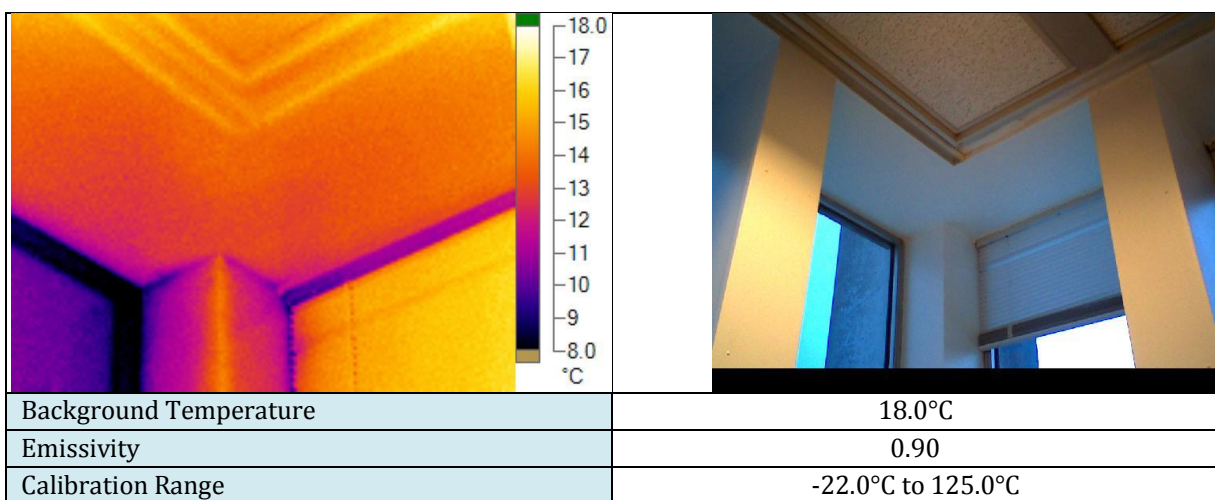
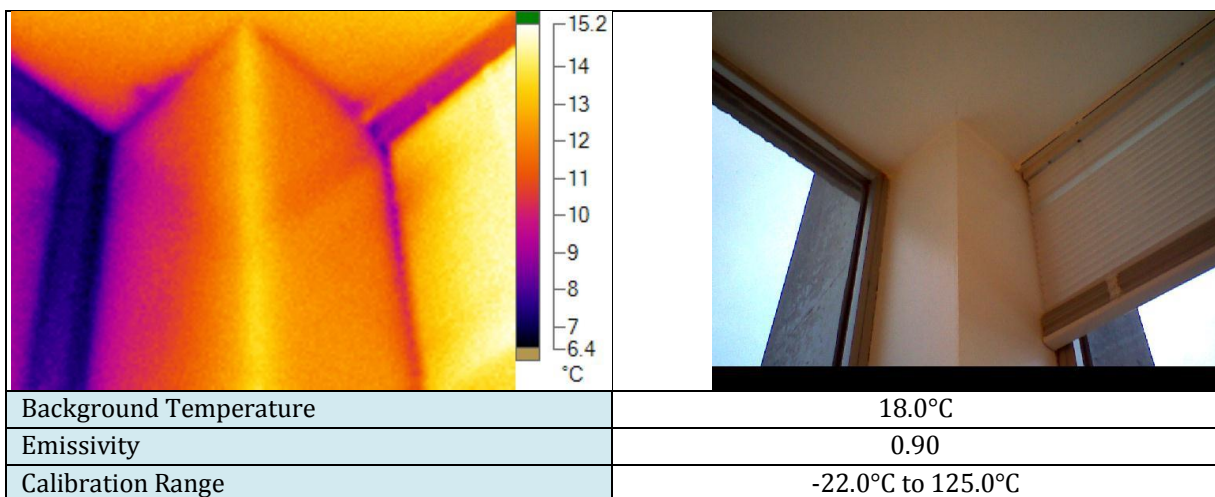
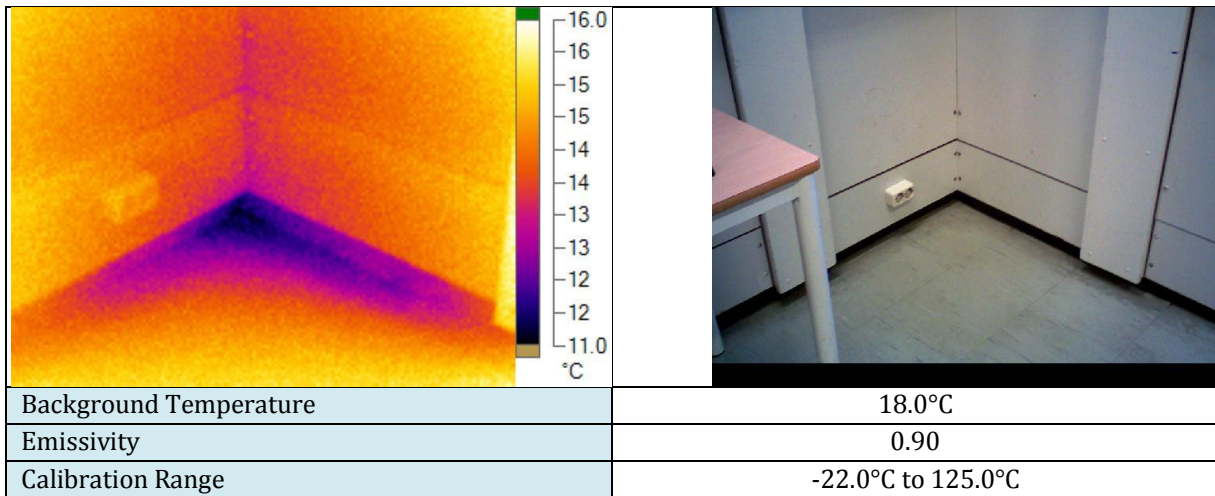


Vedlegg C
 Varmebilder fra Gand Videregående Skole
 26. januar 2012





Vedlegg C
 Varmebilder fra Gand Videregående Skole
 26. januar 2012



Vegger (sandwichelementer)				
Sjikt	Materiale	Tykkelse, d [mm]	Konduktivitet, λ [W/(mK)]	Varmemotstand, R [m ² K/W]
1	Overflate, inne			0,13
2	Betong	50	1,65	0,03
3	Isolasjon	50	0,04	1,25
4	Betong	60	1,65	0,04
5	Overflate, ute			0,04
Sum:				1,49
U-verdi [W/(m ² K)]:				0,6726
U-verdi fra Therm [W/(m ² K)]:				0,6727

Ribber				
Sjikt	Materiale	Tykkelse, d [mm]	Konduktivitet, λ [W/(mK)]	Varmemotstand, R [m ² K/W]
1	Overflate, inne			0,13
2	Gips	15	0,20	0,08
3	Isolasjon	35	0,04	0,88
4	Betong, armert	255	2,30	0,11
5	Isolasjon	20	0,04	0,50
6	Betong, armert	425	2,30	0,18
7	Overflate, ute			0,04
Sum:				1,92
U-verdi [W/(m ² K)]:				0,5220
U-verdi fra Therm [W/(m ² K)]:				0,5220

Tak				
Sjikt	Materiale	Tykkelse d [mm]	Konduktivitet, λ [W/(mK)]	Varmemotstand, R [m ² K/W]
1	Overflate, inne			0,10
2	Betong, armert	240	2,30	0,10
3	Isolasjon, skumplast	50	0,03	1,67
4	Built-up taktekking	2	0,03	0,07
5	Overflate, ute			0,04
Sum:				1,98
U-verdi [W/(m ² K)]:				0,5056
U-verdi fra Therm [W/(m ² K)]:				0,5056

Vedlegg D
U-verdier
 (Beregnet manuelt og i Therm)

Vegg nederst på 2. etasje				
Sjikt	Materiale	Tykkelse, d [mm]	Konduktivitet, λ [W/(mK)]	Varmemotstand, R [m ² K/W]
1	Overflate, inne			0,13
2	Gips	15	0,2	0,08
3	Isolasjon	35	0,04	0,88
4	Betong, armert	215	2,30	0,09
5	Betong, uarmert	60	1,65	0,04
6	Overflate, ute			0,04
Sum:				1,25
U-verdi [W/(m ² K)]:				0,8001
U-verdi fra Therm [W/(m ² K)]:				0,8001

Ribber nederst på 2. etasje				
Sjikt	Materiale	Tykkelse, d [mm]	Konduktivitet, λ [W/(mK)]	Varmemotstand, R [m ² K/W]
1	Overflate, inne			0,13
2	Gips	10	0,2	0,05
3	Betong, armert	255	2,30	0,11
4	Isolasjon	20	0,04	0,50
5	Betong, armert	425	2,30	0,18
6	Overflate, ute			0,04
Sum:				1,02
U-verdi [W/(m ² K)]:				0,9846
U-verdi fra Therm [W/(m ² K)]:				0,9846

Vindu (800 x 2050 mm)			
Sjikt	Materiale	Beskrivelse	Tykkelse, d [mm]
Glass			
2	Isolerglass	887 float glass fra AGC $\epsilon=0,84$	3,124
3	Luft		9,8
4	Isolerglass	887 float glass fra AGC $\epsilon=0,84$	3,124
U-verdi, glass [W/(m ² K)]			2,8360
Karm			
2	Aluminiumskarm med kuldebryter		50
U-verdi, karm [W/(m ² K)]			3,6520
Samlet U-verdi for vinduskonstruksjonen [W/(m ² K)]:			2,9000

Dører (1750 x 3000 mm)			
Sjikt	Materiale	Beskrivelse	Tykkelse, d [mm]
2	Isolerglass	887 float glass fra AGC $\epsilon=0,84$	3,124
3	Luft		9,8
4	Isolerglass	887 float glass fra AGC $\epsilon=0,84$	3,124
U-verdi, glass [W/(m ² K)]			2,7970
2	Aluminiumskarm med kuldebryter		50
U-verdi, karm [W/(m ² K)]			3,6520
Samlet U-verdi for vinduskonstruksjonen [W/(m ² K)]:			2,8380

Takvindu (1750 x 3000 mm, antar 20 grd. helling)			
Sjikt	Materiale	Beskrivelse	Tykkelse, d [mm]
2	Isolerglass	887 float glass fra AGC $\epsilon=0,84$	3,124
3	Luft		9,8
4	Isolerglass	887 float glass fra AGC $\epsilon=0,84$	3,124
U-verdi, glass [W/(m ² K)]			2,9990
2	Aluminiumskarm med kuldebryter		50
U-verdi, karm [W/(m ² K)]			3,6520
Samlet U-verdi for vinduskonstruksjonen [W/(m ² K)]:			3,0270

KULDEBROER VED ETASJESKILLER

Etasjeskille, identisk vegg under og over					
			min.	maks.	
Høyde i Therm	2323,6	mm			
Veggens U-verdi	0,67	W/(m ² K)	0,67	0,67	W/(m ² K)
Veggens varmetap	1,56	W/(mK)	1,56	1,56	W/(mK)
Estimert feilmargin	1,39 %				
Total U-verdi i Therm	0,78	W/(m ² K)	0,77	0,79	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	1,82	W/(mK)	1,79	1,85	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	0,2568	W/(mK)	0,2315	0,2821	W/(mK)
Total estimert feilmargin			9,85 %	9,85 %	

Kuldebro, Etasjeskille - Ribbe					
			min.	maks.	
Høyde i Therm	2000	mm			
Estimert feilmargin	3,15 %				
Total U-verdi i Therm	1,20	W/(m ² K)	1,16	1,24	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	2,40	W/(mK)	2,32	2,48	W/(mK)
Ribbens U-verdi	0,52	W/(m ² K)	0,52	0,52	W/(m ² K)
Ribbens varmetap	1,04	W/(mK)	1,04	1,04	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	1,3558	W/(mK)	1,2802	1,4314	W/(mK)
Total estimert feilmargin			5,58 %	5,58 %	

Kant over etasjeskille i andre etasje					
			min.	maks.	
Høyde i Therm	2200	mm			
Veggens U-verdi	0,80	W/(m ² K)	0,80	0,80	W/(m ² K)
Veggens varmetap	1,76	W/(mK)	1,76	1,76	W/(mK)
Estimert feilmargin	0,08 %				
Total U-verdi i Therm	0,80	W/(m ² K)	0,80	0,80	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	1,77	W/(mK)	1,77	1,77	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	0,0081	W/(mK)	0,0067	0,0096	W/(mK)
Total estimert feilmargin			17,38 %	17,38 %	

Vedlegg D
Kuldebroverdier
 (Beregnet fra U-verdier samt modeller i Therm)

Etasjeskille, 1-2 etasje					
			min.	maks.	
Høyde i Therm, vegg, 2. etasje	1135	mm			
Høyde i Therm, vegg, 1. etasje	1135	mm			
Estimert feilmargin	0,94 %				
Total U-verdi i Therm	1,92	W/(m ² K)	1,90	1,94	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	4,36	W/(mK)	4,32	4,40	W/(mK)
U-verdi, vegg, 2. etasje	0,80	W/(m ² K)	0,80	0,80	W/(m ² K)
Varmetap, vegg, 2. etasje	0,91	W/(mK)	0,91	0,91	W/(mK)
U-verdi, vegg, 1. etasje	2,95	W/(m ² K)	2,95	2,95	W/(m ² K)
Varmetap, vegg, 1. etasje	3,35	W/(mK)	3,35	3,35	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	0,1058	W/(mK)	0,0648	0,1468	W/(mK)
Total estimert feilmargin			38,76 %	38,76 %	

KULDEBROER VED TAK

Kuldebro, Tak - Vegg					
			min.	maks.	
Tak, lengde i Therm	1010	mm			
Tak, U-verdi separat	0,51	W/(m ² K)	0,51	0,51	W/(m ² K)
Estimert feilmargin	1,62 %				
Tak, U-verdi kombinert	0,84	W/(m ² K)	0,83	0,86	W/(m ² K)
Tak, differanse i varmetap	0,34	W/(mK)	0,33	0,35	W/(mK)
Vegg, lengde i Therm	1000	mm			
Vegg, U-verdi separat	0,67	W/(m ² K)	0,67	0,67	W/(m ² K)
Estimert feilmargin	1,62 %				
Vegg, U-verdi kombinert	0,74	W/(m ² K)	0,73	0,75	W/(m ² K)
Vegg, differanse i varmetap	0,07	W/(mK)	0,05	0,08	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	0,4063	W/(mK)	0,3805	0,4320	W/(mK)
Total estimert feilmargin			6,34 %	6,34 %	

Kuldebro, Tak - Ribbe					
			min.	maks.	
Tak, lengde i Therm	995	mm			
Tak, U-verdi separat	0,51	W/(m ² K)	0,51	0,51	W/(m ² K)
Estimert feilmargin	1,83 %				
Tak, U-verdi kombinert	0,93	W/(m ² K)	0,91	0,95	W/(m ² K)
Tak, differanse i varmetap	0,42	W/(mK)	0,41	0,44	W/(mK)
Ribbe, lengde i Therm	1000	mm			
Ribbe, U-verdi separat	0,52	W/(m ² K)	0,52	0,52	W/(m ² K)
Estimert feilmargin	1,83 %				
Ribbe, U-verdi kombinert	1,30	W/(m ² K)	1,28	1,33	W/(m ² K)
Ribbe, differanse i varmetap	0,78	W/(mK)	0,76	0,80	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	1,2025	W/(mK)	1,1617	1,2432	W/(mK)
Total estimert feilmargin			3,39 %	3,39 %	

KULDEBROER VED RIBBER

Total kuldebroverdi forårsaket av ribbe (kun X-retning)					
			min.	maks.	
Innvendig bredde	2250	mm			
U-verdi, vegg	0,67	W/(m ² K)	0,67	0,67	W/(m ² K)
Varmetap, vegg	1,51	W/(mK)	1,51	1,51	W/(mK)
Estimert feilmargin	1,55 %				
Total U-verdi i Therm	0,86	W/(m ² K)	0,85	0,88	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	1,94	W/(mK)	1,91	1,97	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	0,4295	W/(mK)	0,3994	0,4596	W/(mK)
Total estimert feilmargin			7,01 %	7,01 %	

Kuldebro, Enden på ribbene (2. etasje)					
			min.	maks.	
Høyde i Therm, vegg	1000	mm			
Høyde i Therm, ribbe	1000	mm			
Estimert feilmargin	1,87 %				
Total U-verdi i Therm	1,12	W/(m ² K)	1,09	1,14	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	2,23	W/(mK)	2,19	2,27	W/(mK)
U-verdi, vegg	0,80	W/(m ² K)	0,80	0,80	W/(m ² K)
Varmetap, vegg	0,80	W/(mK)	0,80	0,80	W/(mK)
U-verdi, ribbe	0,98	W/(m ² K)	0,98	0,98	W/(m ² K)
Varmetap, ribbe	0,98	W/(mK)	0,98	0,98	W/(mK)
Kuldebroverdi Ψ_y	0,4467	W/(mK)	0,4050	0,4884	W/(mK)
Total estimert feilmargin			9,34 %	9,34 %	

KULDEBROER VED HJØRNER

Hjørner i andre etasje					
			min.	maks.	
Total innvendig bredde	2000	mm			
U-verdi, vegg	0,80	W/(m ² K)	0,80	0,80	W/(m ² K)
Varmetap, vegg	1,60	W/(mK)	1,60	1,60	W/(mK)
Estimert feilmargin	0,22 %				
Total U-verdi i Therm	0,82	W/(m ² K)	0,82	0,82	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	1,65	W/(mK)	1,64	1,65	W/(mK)
Kuldebroverdi Ψ_y	0,0460	W/(mK)	0,0424	0,0496	W/(mK)
Total estimert feilmargin			7,87 %	7,87 %	

Hjørner bestående av to ribber (tredje og fjerde etasje)					
			min.	maks.	
Total innvendig bredde	2400	mm			
U-verdi, vegg	0,67	W/(m ² K)	0,67	0,67	W/(m ² K)
Varmetap, vegg	1,61	W/(mK)	1,61	1,61	W/(mK)
Estimert feilmargin	1,93 %				
Total U-verdi i Therm	1,10	W/(m ² K)	1,08	1,13	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	2,65	W/(mK)	2,60	2,70	W/(mK)
Kuldebroverdi Ψ_y	1,0346	W/(mK)	0,9835	1,0858	W/(mK)
Total estimert feilmargin			4,94 %	4,94 %	

KULDEBROER VED VINDUER

Overgang Vegg - Vinduets underkant					
			min.	maks.	
Høyde i Therm, vegg	1070	mm			
Høyde i Therm, vindu	245	mm			
Estimert feilmargin	4,66 %				
Total U-verdi i Therm	1,48	W/(m ² K)	1,41	1,54	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	1,94	W/(mK)	1,85	2,03	W/(mK)
U-verdi, vegg	0,67	W/(m ² K)	0,67	0,67	W/(m ² K)
Varmetap, vegg	0,72	W/(mK)	0,72	0,72	W/(mK)
U-verdi, vindu	2,90	W/(m ² K)	2,90	2,90	W/(m ² K)
Varmetap, vindu	0,71	W/(mK)	0,71	0,71	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	0,5101	W/(mK)	0,4197	0,6005	W/(mK)
Total estimert feilmargin			17,73 %	17,73 %	

Overgang Vegg - Vinduets overkant					
			min.	maks.	
Høyde i Therm, vegg	1020	mm			
Høyde i Therm, vindu	245	mm			
Estimert feilmargin	4,15 %				
Total U-verdi i Therm	1,29	W/(m ² K)	1,24	1,35	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	1,63	W/(mK)	1,57	1,70	W/(mK)
U-verdi, vegg	0,67	W/(m ² K)	0,67	0,67	W/(m ² K)
Varmetap, vegg	0,69	W/(mK)	0,69	0,69	W/(mK)
U-verdi, vindu	2,90	W/(m ² K)	2,90	2,90	W/(m ² K)
Varmetap, vindu	0,71	W/(mK)	0,71	0,71	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	0,2376	W/(mK)	0,1698	0,3054	W/(mK)
Total estimert feilmargin			28,54 %	28,54 %	

Overgang Vindu - Ribbe (vindu på en side)					
			min.	maks.	
Høyde i Therm, ribbe	1170	mm			
Høyde i Therm, vindu	1050	mm			
Estimert feilmargin	3,81 %				
Total U-verdi i Therm	1,69	W/(m ² K)	1,63	1,76	W/(m ² K)
Totalt varmetap i Therm	3,76	W/(mK)	3,62	3,90	W/(mK)
U-verdi, ribbe	0,52	W/(m ² K)	0,52	0,52	W/(m ² K)
Varmetap, ribbe	0,61	W/(mK)	0,61	0,61	W/(mK)
U-verdi, vindu	2,90	W/(m ² K)	2,90	2,90	W/(m ² K)
Varmetap, vindu	3,05	W/(mK)	3,05	3,05	W/(mK)
Kuldebroverdi $\Psi_{x,z}$	0,1043	W/(mK)	-0,0390	0,2475	W/(mK)
Total estimert feilmargin			137,38 %	137,38 %	

Vedlegg F

Oversikt over dimensjoner med tilhørende Effekttap ved $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

FLATER								
Vegger inkl. ribber		Antall	Bredde [m]	Høyde [m]	Bruttoareal [m ²]	Nettoareal [m ²]	U-verdi [W/(m ² K)]	Effekttap [W]
2. etasje	Nord	0	29,75	1	29,75	29,75	0,80	476,06
Nedre del	Øst	0	35,75	1	35,75	30,50	0,80	488,06
	Sør	0	29,75	1	29,75	29,75	0,80	476,06
	Vest	0	35,75	1	35,75	35,75	0,80	572,07
2. etasje	Nord	29	29,75	0,42	12,50	12,50	0,67	168,09
Øvre del	Øst	35	35,75	0,42	15,02	15,02	0,67	202,00
	Sør	29	29,75	0,42	12,50	12,50	0,67	168,09
	Vest	35	35,75	0,42	15,02	15,02	0,67	202,00
3. etasje	Nord	29	29,75	1,42	42,25	42,25	0,67	568,32
	Øst	35	35,75	1,42	50,77	50,77	0,67	682,94
	Sør	29	29,75	1,42	42,25	42,25	0,67	568,32
	Vest	35	35,75	1,42	50,77	50,77	0,67	682,94
4. etasje	Nord	29	29,75	1,56	46,41	46,41	0,67	624,35
	Øst	35	35,75	1,56	55,77	55,77	0,67	750,27
	Sør	29	29,75	1,56	46,41	46,41	0,67	624,35
	Vest	35	35,75	1,56	55,77	55,77	0,67	750,27
Sum:								8004,18

Vedlegg F
Oversikt over dimensjoner med tilhørende
Effekttap ved $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Vinduer		Antall	Bredde [m]	Høyde [m]	Bruttoareal [m ²]	Nettoareal [m ²]	U-verdi [W/(m ² K)]	Effekttap [W]
2. etasje	Nord	30	0,8	2,05	49,2	49,2	2,90	2853,60
	Øst	30	0,8	2,05	49,2	49,2	2,90	2853,60
	Sør	30	0,8	2,05	49,2	49,2	2,90	2853,60
	Vest	36	0,8	2,05	59,04	59,04	2,90	3424,32
3. etasje	Nord	30	0,8	2,05	49,2	49,2	2,90	2853,60
	Øst	36	0,8	2,05	59,04	59,04	2,90	3424,32
	Sør	30	0,8	2,05	49,2	49,2	2,90	2853,60
	Vest	36	0,8	2,05	59,04	59,04	2,90	3424,32
4. etasje	Nord	30	0,8	2,05	49,2	49,2	2,90	2853,60
	Øst	36	0,8	2,05	59,04	59,04	2,90	3424,32
	Sør	30	0,8	2,05	49,2	49,2	2,90	2853,60
	Vest	36	0,8	2,05	59,04	59,04	2,90	3424,32
Sum:								37096,80

Dører		Antall	Bredde [m]	Høyde [m]	Bruttoareal [m ²]	Nettoareal [m ²]	U-verdi [W/(m ² K)]	Effekttap [W]
2. etasje	Øst	3	1,75	3	15,75	15,75	2,84	893,97
Sum:								893,97

Tak		Antall	Lengde [m]	Bredde [m]	Bruttoareal [m ²]	Nettoareal [m ²]	U-verdi [W/(m ² K)]	Effekttap [W]
Tak over 4. etasje		1	35,75	29,75	1063,56	975,64	0,51	9866,53
Tak over påbygg		1	14	6	84	84	0,00	0,00
Takvinduer		8	0,7	0,7	3,92	3,92	3,027	237,32
Sum:								10103,85

HORISONTALE KULDEBROER

Etasjeskille - Vegg		Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
1.-2. etasje	Ø	1	30,50	30,5	0,11	0,06	0,15	65	40	90
	V	1	35,75	35,75	0,11	0,06	0,15	76	46	105
2.-3. etasje	N	30	0,75	22,5	0,26	0,23	0,28	116	104	127
	Ø	36	0,75	27	0,26	0,23	0,28	139	125	152
	S	30	0,75	22,5	0,26	0,23	0,28	116	104	127
	V	36	0,75	27	0,26	0,23	0,28	139	125	152
3.-4. etasje	N	30	0,75	22,5	0,26	0,23	0,28	116	104	127
	Ø	36	0,75	27	0,26	0,23	0,28	139	125	152
	S	30	0,75	22,5	0,26	0,23	0,28	116	104	127
	V	36	0,75	27	0,26	0,23	0,28	139	125	152
Sum:								1156,92	1002,42	1311,43

Etasjeskille - Ribbe		Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
2.-3. etasje	N	29	0,25	7,25	1,36	1,28	1,43	197	186	208
	Ø	35	0,25	8,75	1,36	1,28	1,43	237	224	250
	S	29	0,25	7,25	1,36	1,28	1,43	197	186	208
	V	35	0,25	8,75	1,36	1,28	1,43	237	224	250
3.-4. etasje	N	29	0,25	7,25	1,36	1,28	1,43	197	186	208
	Ø	35	0,25	8,75	1,36	1,28	1,43	237	224	250
	S	29	0,25	7,25	1,36	1,28	1,43	197	186	208
	V	35	0,25	8,75	1,36	1,28	1,43	237	224	250
Sum:								1735,42	1638,66	1832,18

Vedlegg F
Oversikt over dimensjoner med tilhørende
Effekttap ved $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Hvit kant 2. etasje	Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]	
2. etasje	N	1	29,75	29,75	0,01	0,01	0,01	5	4	6
	Ø	1	30,5	30,5	0,01	0,01	0,01	5	4	6
	S	1	29,75	29,75	0,01	0,01	0,01	5	4	6
	V	1	35,75	35,75	0,01	0,01	0,01	6	5	7
Sum:								20,47	16,91	24,03

Vegg - Tak	Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]	
2. etasje	N	30	0,75	22,5	0,41	0,38	0,43	183	171	194
	Ø	36	0,75	27	0,41	0,38	0,43	219	205	233
	S	30	0,75	22,5	0,41	0,38	0,43	183	171	194
	V	36	0,75	27	0,41	0,38	0,43	219	205	233
Sum:								804,42	753,43	855,41

Ribber - Tak	Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]	
2. etasje	N	29	0,25	7,25	1,20	1,16	1,24	174	168	180
	Ø	35	0,25	8,75	1,20	1,16	1,24	210	203	218
	S	29	0,25	7,25	1,20	1,16	1,24	174	168	180
	V	35	0,25	8,75	1,20	1,16	1,24	210	203	218
Sum:								769,59	743,50	795,68

Vedlegg F

Oversikt over dimensjoner med tilhørende Effekttap ved $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Vegg - Underkant av Vinduer		Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
2. etasje	N	30	0,8	24	0,51	0,42	0,60	245	201	288
	Ø	30	0,8	24	0,51	0,42	0,60	245	201	288
	S	30	0,8	24	0,51	0,42	0,60	245	201	288
	V	36	0,8	28,8	0,51	0,42	0,60	294	242	346
3. etasje	N	30	0,8	24	0,51	0,42	0,60	245	201	288
	Ø	36	0,8	28,8	0,51	0,42	0,60	294	242	346
	S	30	0,8	24	0,51	0,42	0,60	245	201	288
	V	36	0,8	28,8	0,51	0,42	0,60	294	242	346
4. etasje	N	30	0,8	24	0,51	0,42	0,60	245	201	288
	Ø	36	0,8	28,8	0,51	0,42	0,60	294	242	346
	S	30	0,8	24	0,51	0,42	0,60	245	201	288
	V	36	0,8	28,8	0,51	0,42	0,60	294	242	346
Sum:								3183	2619	3747

Vegg - Overkant av Vinduer		Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
2. etasje	N	30	0,8	24	0,24	0,17	0,31	114	81	147
	Ø	30	0,8	24	0,24	0,17	0,31	114	81	147
	S	30	0,8	24	0,24	0,17	0,31	114	81	147
	V	36	0,8	28,8	0,24	0,17	0,31	137	98	176
3. etasje	N	30	0,8	24	0,24	0,17	0,31	114	81	147
	Ø	36	0,8	28,8	0,24	0,17	0,31	137	98	176
	S	30	0,8	24	0,24	0,17	0,31	114	81	147
	V	36	0,8	28,8	0,24	0,17	0,31	137	98	176
4. etasje	N	30	0,8	24	0,24	0,17	0,31	114	81	147
	Ø	36	0,8	28,8	0,24	0,17	0,31	137	98	176
	S	30	0,8	24	0,24	0,17	0,31	114	81	147
	V	36	0,8	28,8	0,24	0,17	0,31	137	98	176
Sum:								1483	1059	1906

Vedlegg F
Oversikt over dimensjoner med tilhørende
Effekttap ved $\Delta T = 20\text{ }^\circ\text{C}$

Vegg - Overkant av Dører		Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
2. etasje	Ø	3	3,5	10,5	0,24	0,17	0,31	50	36	64
Sum:								50	36	64

VERTIKALE KULDEBROER

Ribber - Vegg		Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
2. etasje	N	29	0,42	12,18	0,43	0,40	0,46	105	97	112
Øvre del	Ø	29	0,42	12,18	0,43	0,40	0,46	105	97	112
	S	29	0,42	12,18	0,43	0,40	0,46	105	97	112
	V	35	0,42	14,7	0,43	0,40	0,46	126	117	135
3. etasje	N	29	1,42	41,18	0,43	0,40	0,46	354	329	379
	Ø	35	1,42	49,7	0,43	0,40	0,46	427	397	457
	S	29	1,42	41,18	0,43	0,40	0,46	354	329	379
	V	35	1,42	49,7	0,43	0,40	0,46	427	397	457
4. etasje	N	29	1,56	45,24	0,43	0,40	0,46	389	361	416
	Ø	35	1,56	54,6	0,43	0,40	0,46	469	436	502
	S	29	1,56	45,24	0,43	0,40	0,46	389	361	416
	V	35	1,56	54,6	0,43	0,40	0,46	469	436	502
Sum:								3716,94	3456,31	3977,57

Vinduer - Ribber		Antall	Lengde per stk. [m]	Totallengde [m]	ψ -verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
2. etasje	N	30	4,1	123	0,10	-0,04	0,25	257	-96	609
	Ø	30	4,1	123	0,10	-0,04	0,25	257	-96	609
	S	30	4,1	123	0,10	-0,04	0,25	257	-96	609
	V	36	4,1	147,6	0,10	-0,04	0,25	308	-115	731
3. etasje	N	30	4,1	123	0,10	-0,04	0,25	257	-96	609
	Ø	36	4,1	147,6	0,10	-0,04	0,25	308	-115	731
	S	30	4,1	123	0,10	-0,04	0,25	257	-96	609
	V	36	4,1	147,6	0,10	-0,04	0,25	308	-115	731
4. etasje	N	30	4,1	123	0,10	-0,04	0,25	257	-96	609
	Ø	36	4,1	147,6	0,10	-0,04	0,25	308	-115	731
	S	30	4,1	123	0,10	-0,04	0,25	257	-96	609
	V	36	4,1	147,6	0,10	-0,04	0,25	308	-115	731
Sum:								3335	-1247	7916

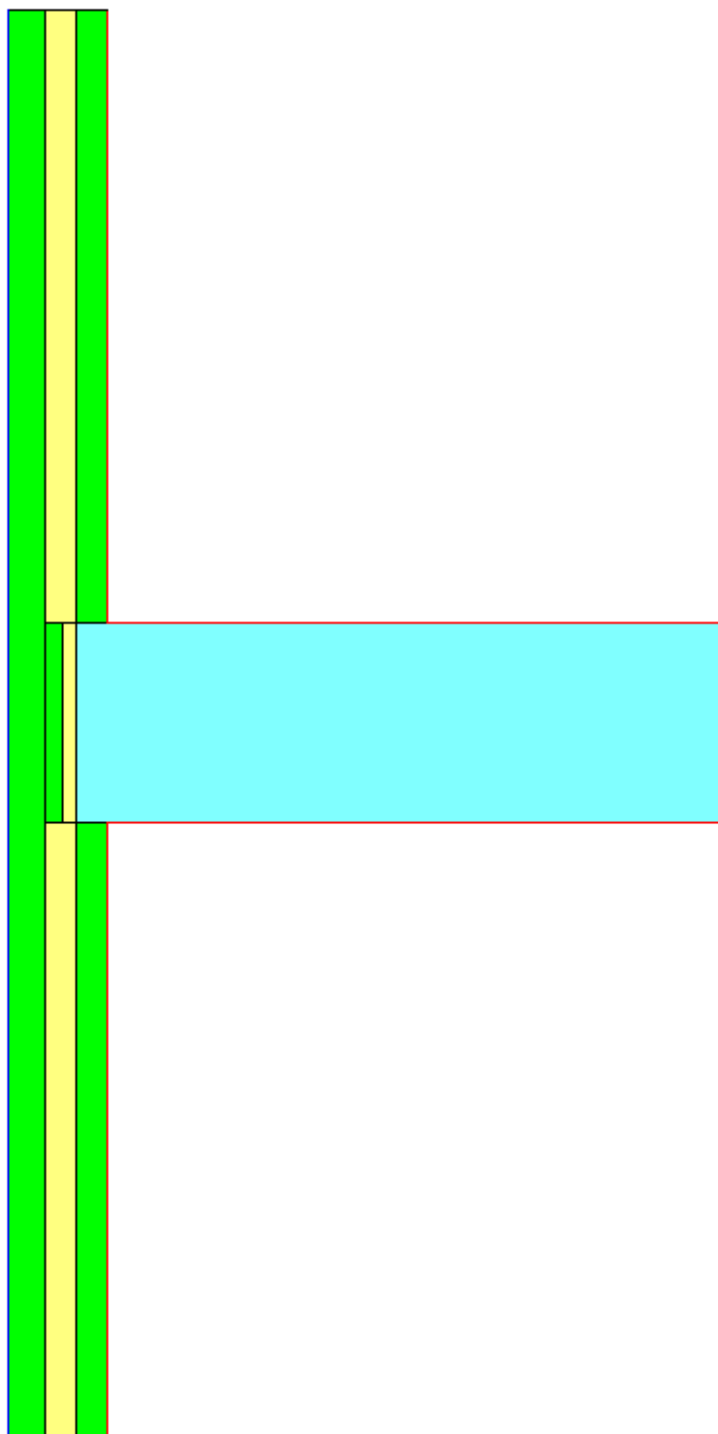
Vedlegg F
Oversikt over dimensjoner med tilhørende
Effekttap ved $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Dører - Ribber		Antall	Lengde per stk. [m]	Total lengde [m]	ψ-verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
2. etasje	Ø	3	6	18	0,10	-0,04	0,25	38	-14	89
Sum:								38	-14	89

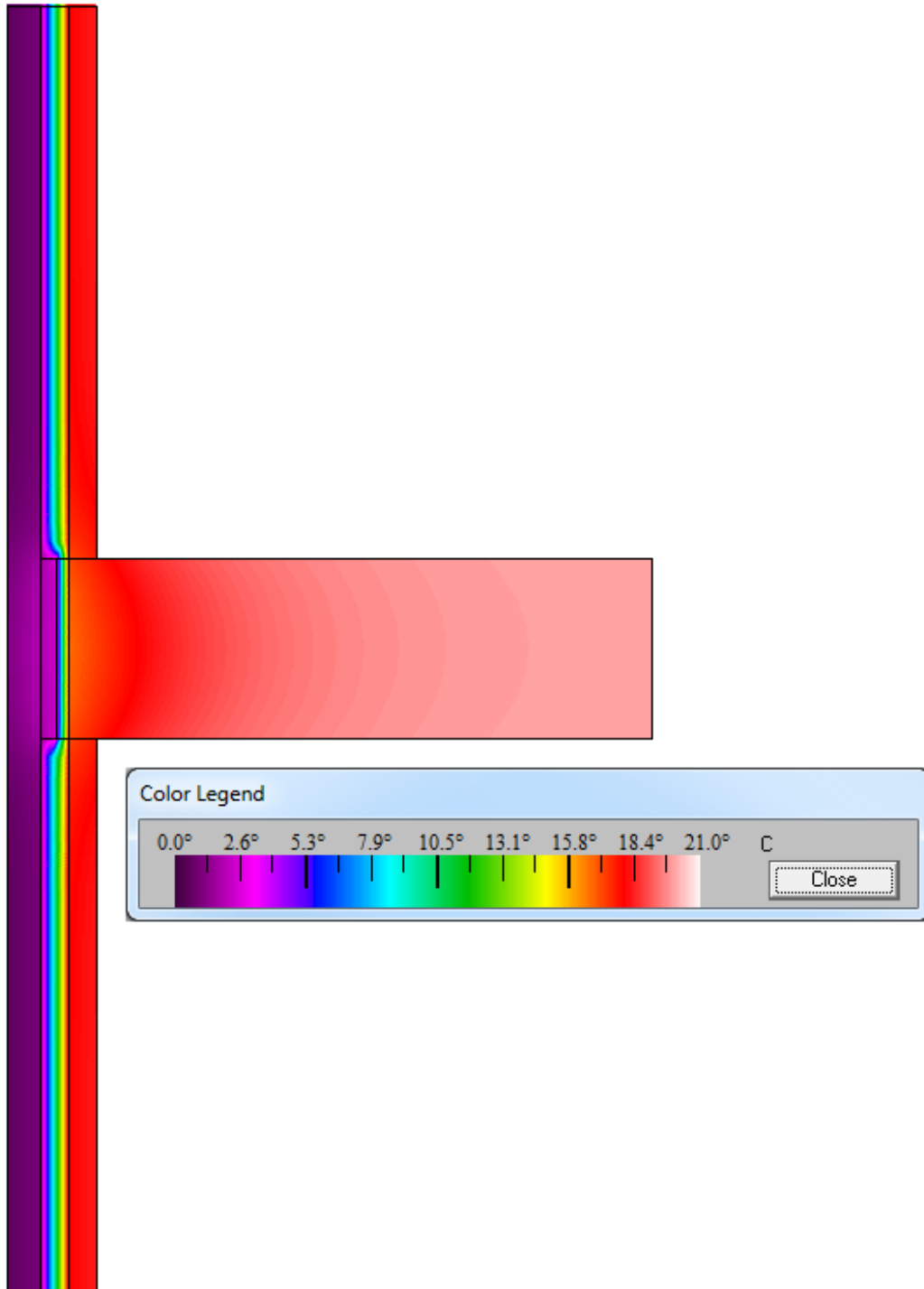
Hjørner		Antall	Lengde per stk. [m]	Total lengde [m]	ψ-verdi [W/(mK)]	ψ_{\min} [W/(mK)]	ψ_{\max} [W/(mK)]	Effekttap [W]	P_{\min} [W]	P_{\max} [W]
2. etasje	NØ	1	1	1	0,05	0,04	0,05	1	1	1
2. etasje	SØ	1	1	1	0,05	0,04	0,05	1	1	1
2. etasje	SV	1	1	1	0,05	0,04	0,05	1	1	1
2. etasje	NV	1	1	1	0,05	0,04	0,05	1	1	1
Ribber	NØ	1	9,55	9,55	1,03	0,98	1,09	198	188	207
Ribber	SØ	1	9,55	9,55	1,03	0,98	1,09	198	188	207
Ribber	SV	1	9,55	9,55	1,03	0,98	1,09	198	188	207
Ribber	NV	1	9,55	9,55	1,03	0,98	1,09	198	188	207
Sum:						4,10	4,54	794,14	754,79	833,50

KULDEBROER VED ETASJESKILLER

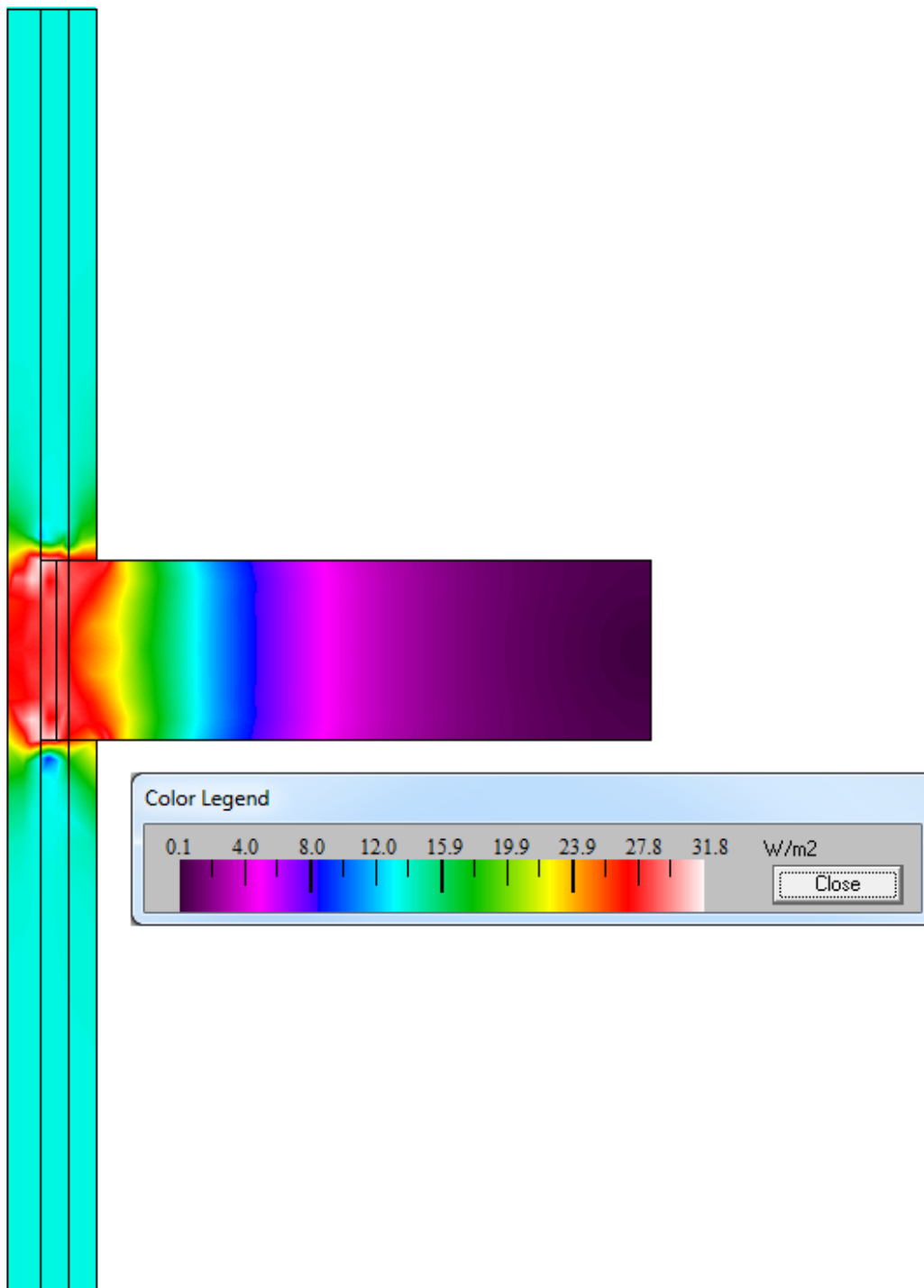
**Etasjeskille, identisk vegg under og over
Materialer**



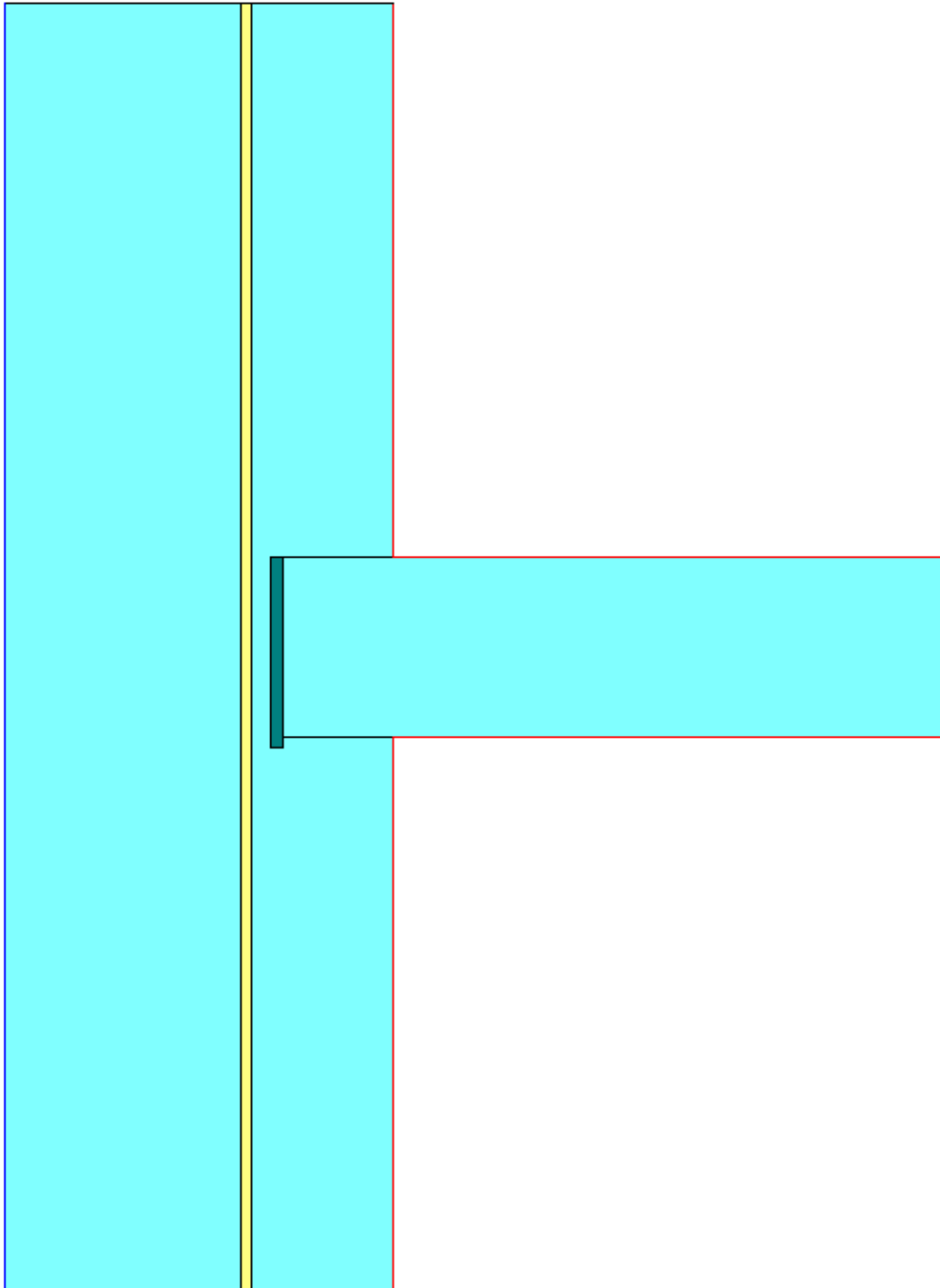
Etasjeskille, identisk vegg under og over
Temperaturfordeling



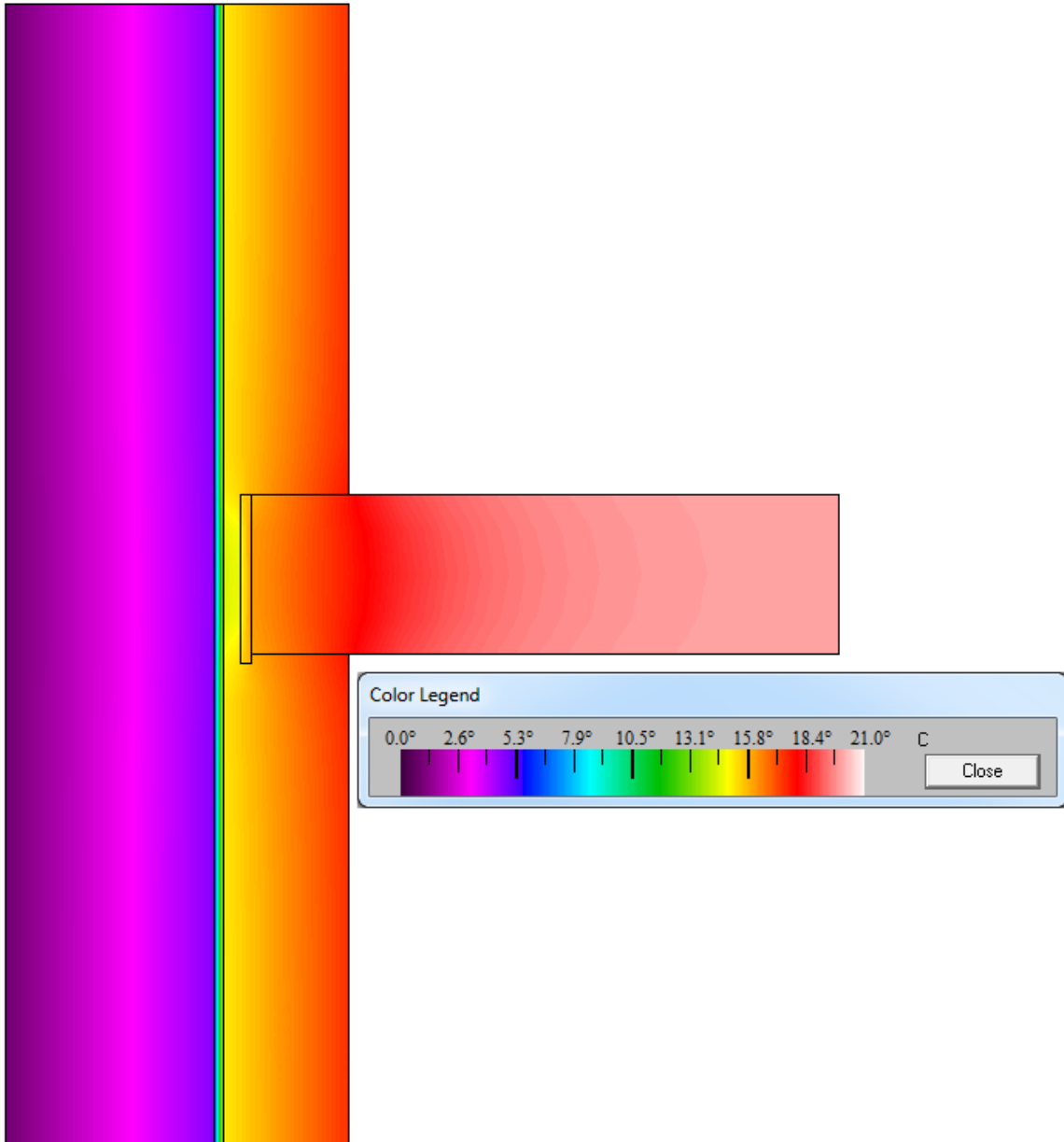
**Etasjeskille, identisk vegg under og over
Flukstetthet**



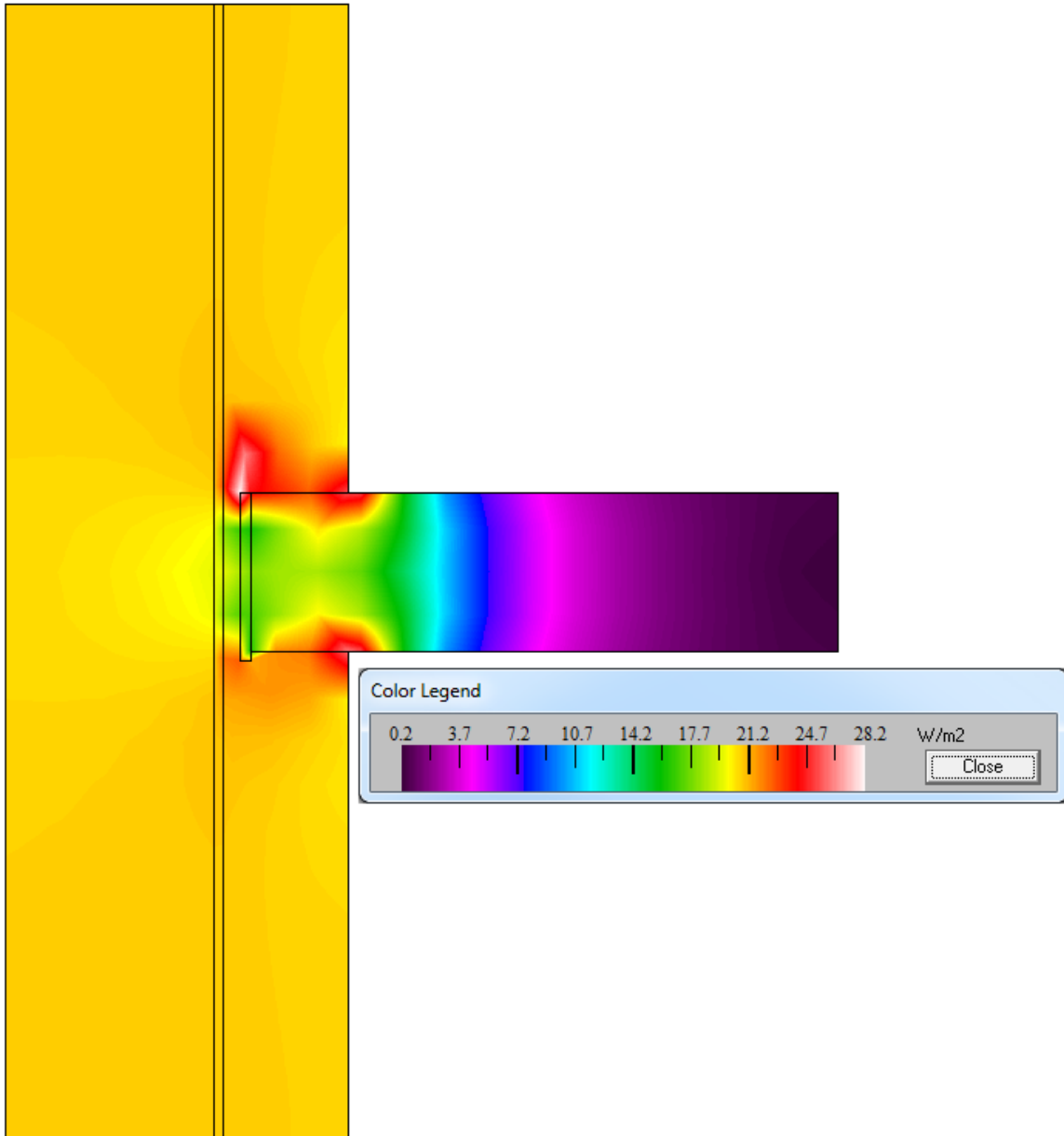
Etasjeskille - Ribbe
Materialer



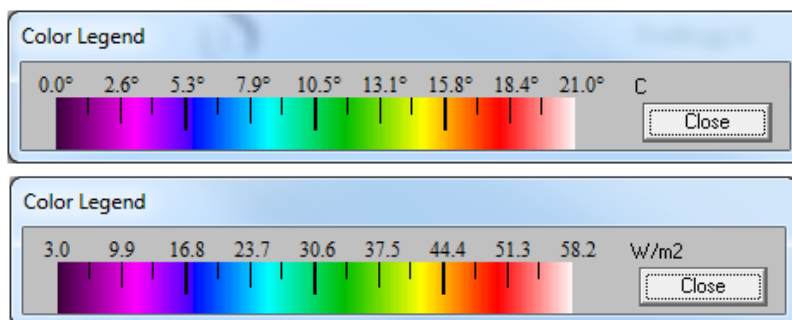
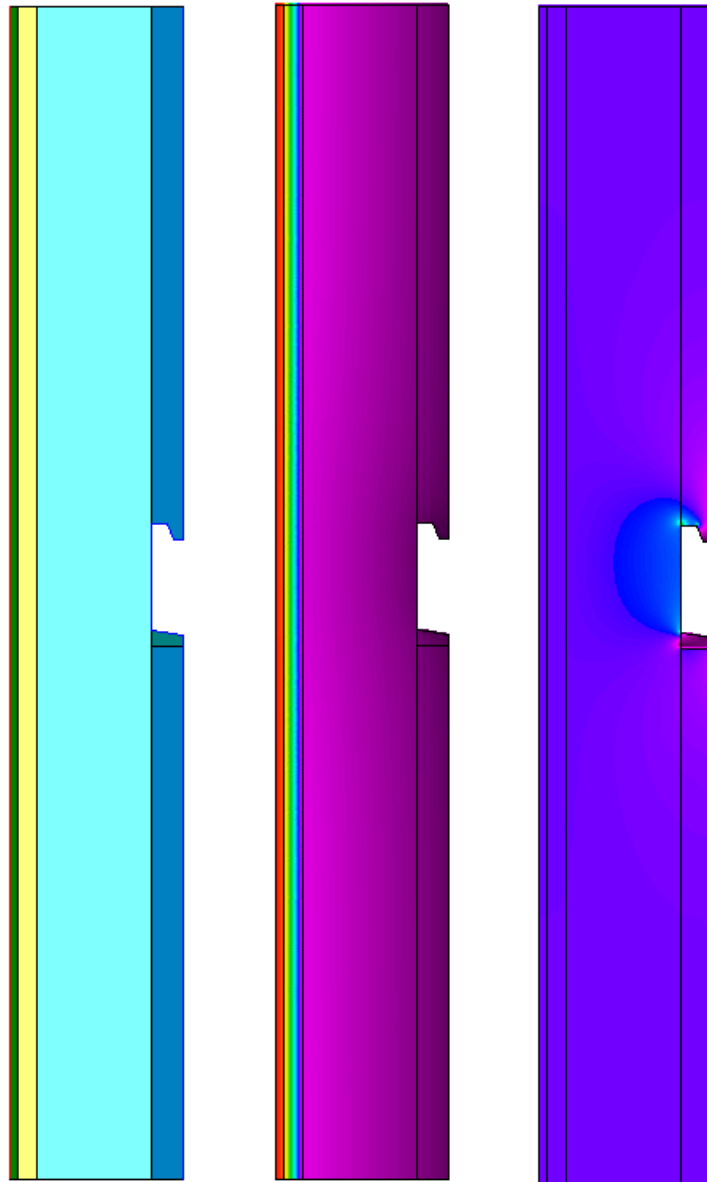
Etasjeskille - Ribbe
Temperaturfordeling



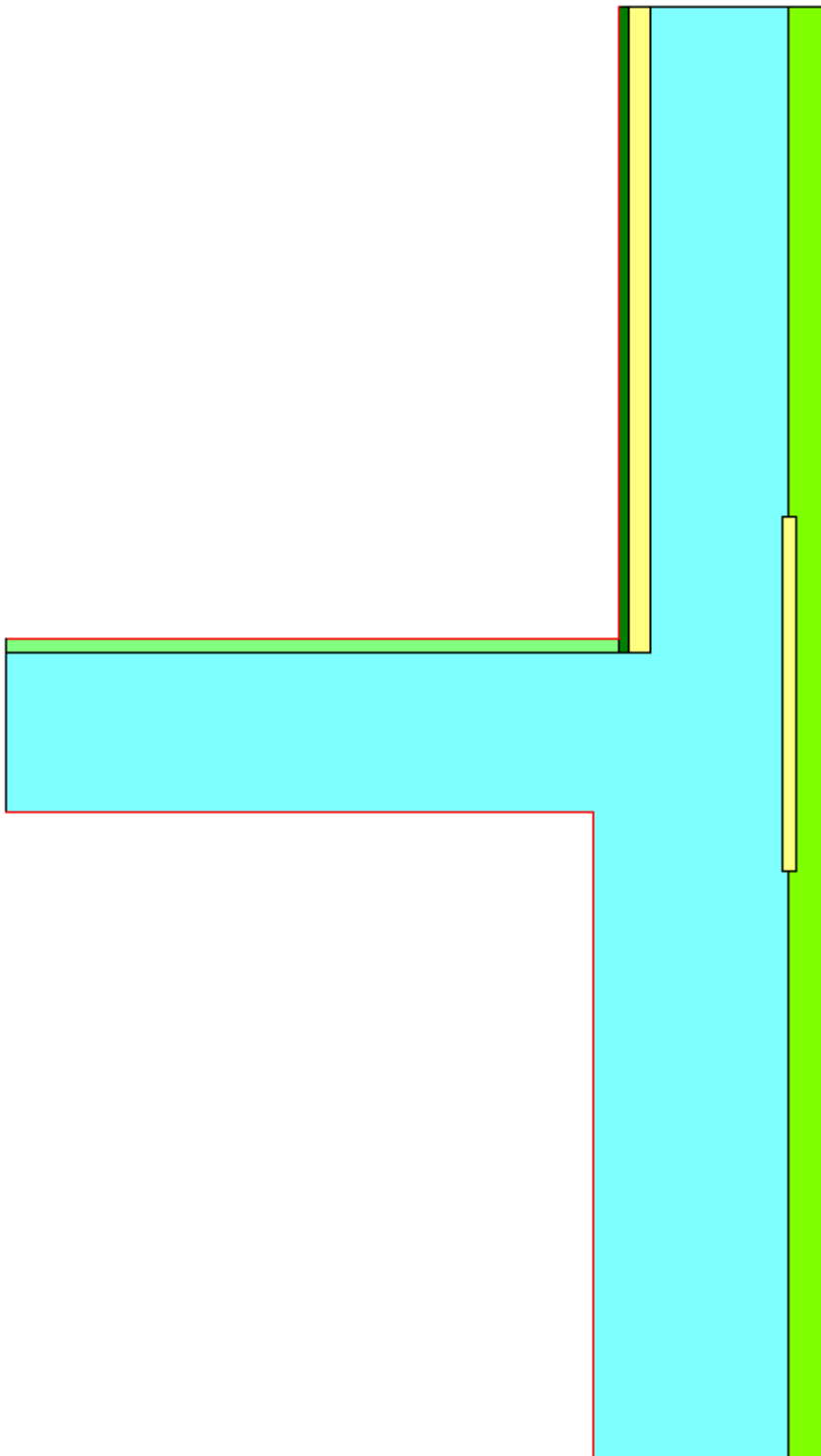
Etasjeskille - Ribbe
Flukstetthet



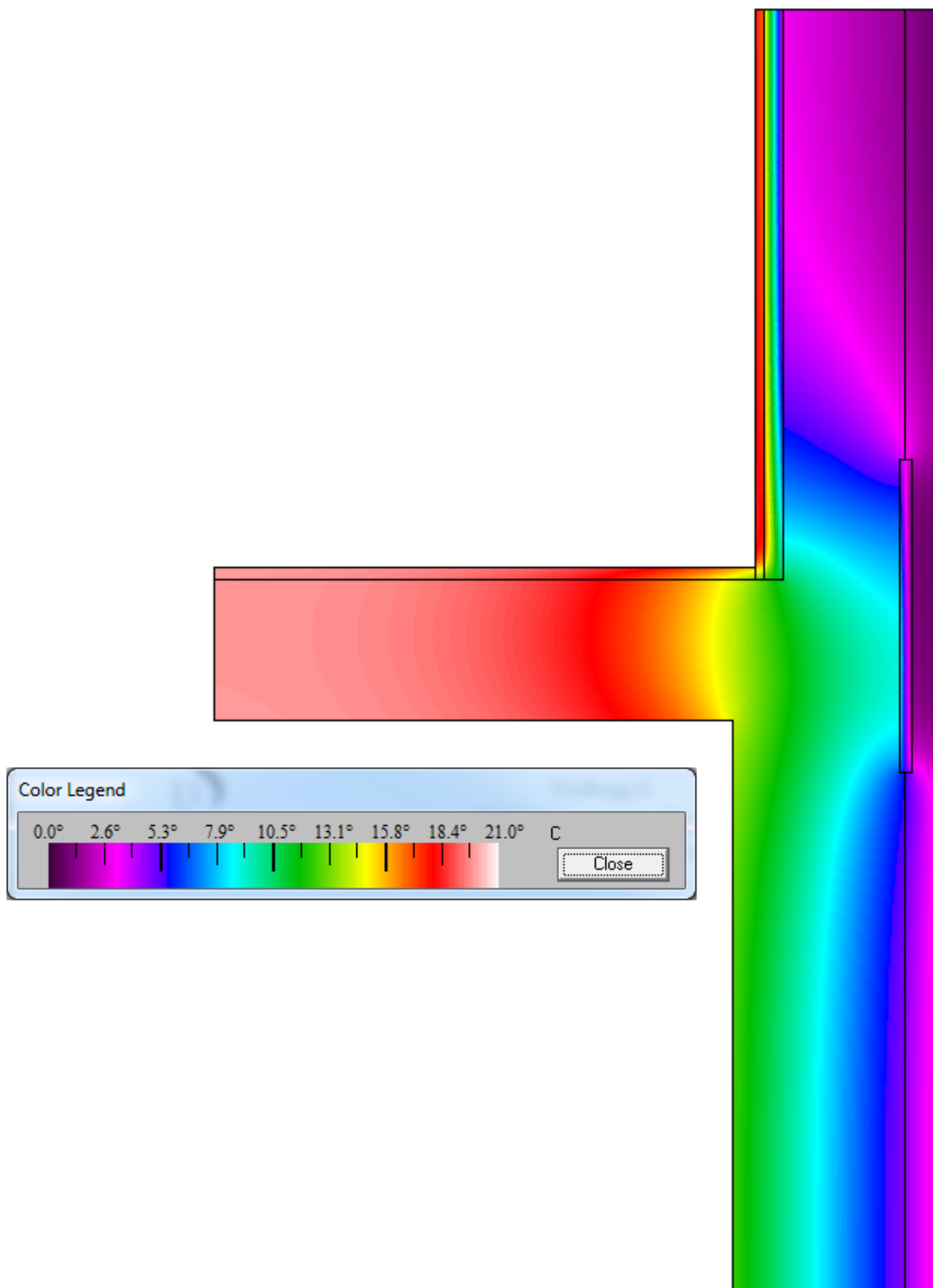
Kant over etasjeskille i andre etasje
Materialer, Temperaturfordeling og Flukstetthet



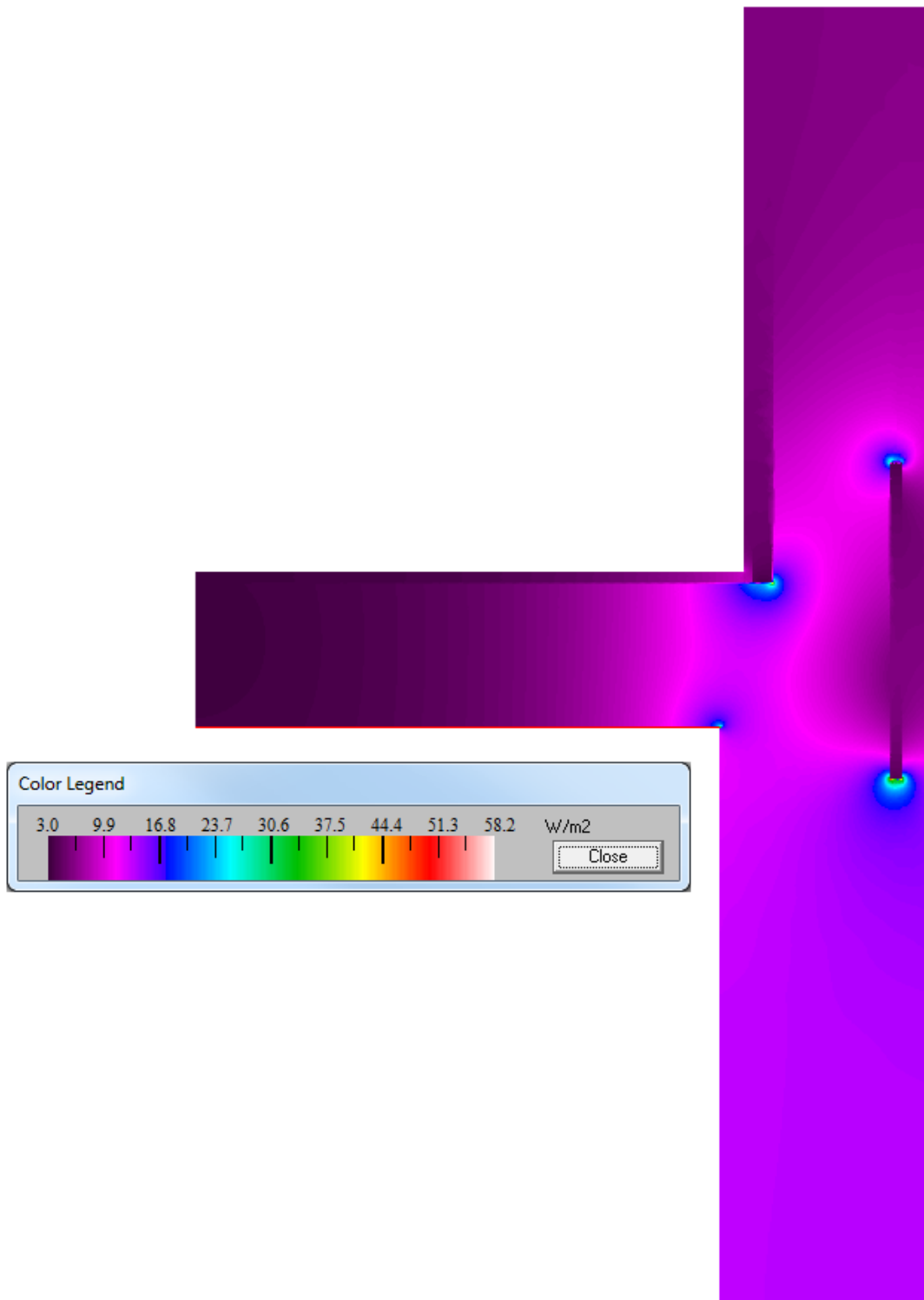
Etasjeskille, 1-2 egt
Materialer



**Etasjeskille, 1-2 etasje
Temperaturfordeling**

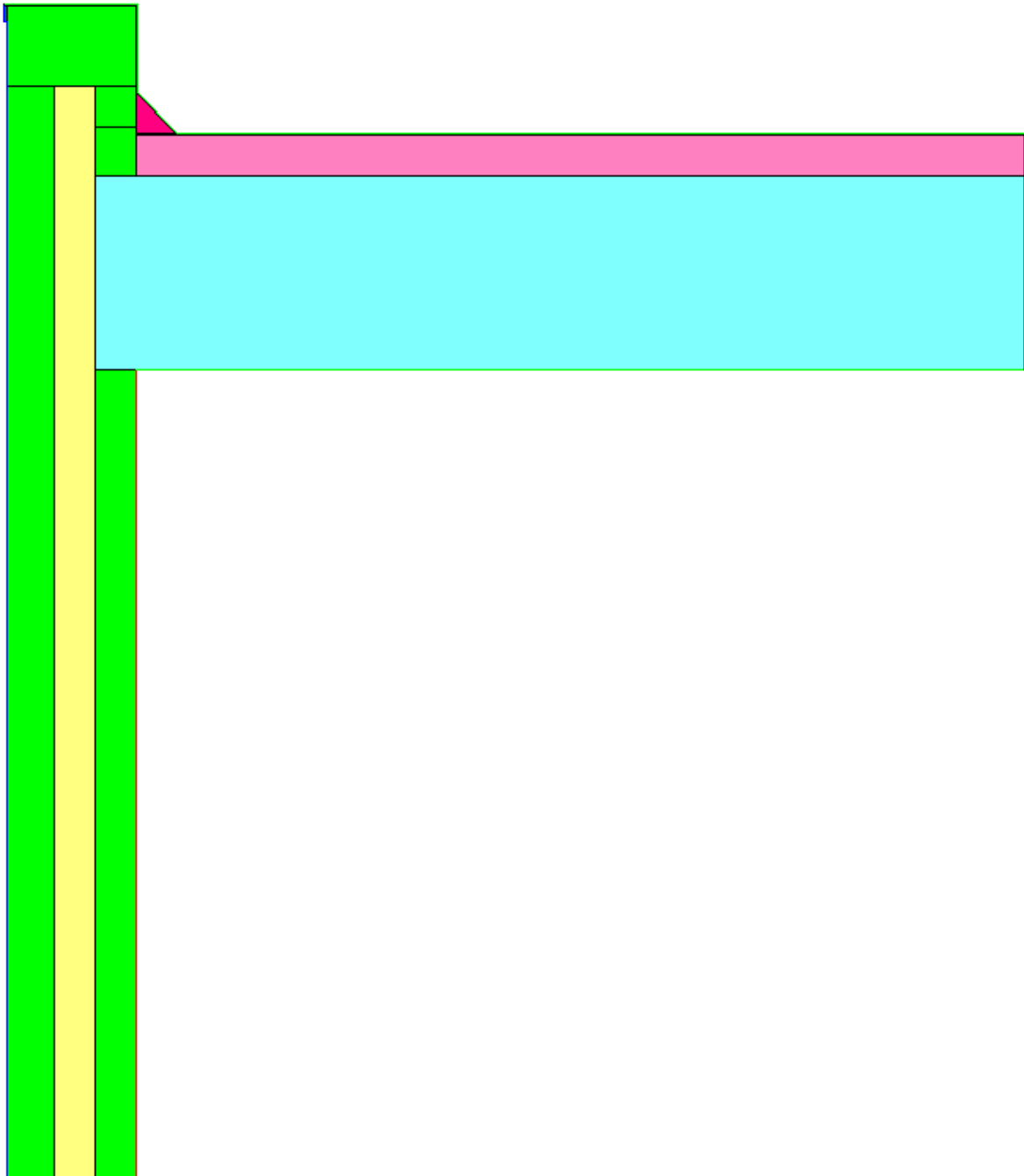


Etasjeskille, 1-2 etasje
Flukstetthet

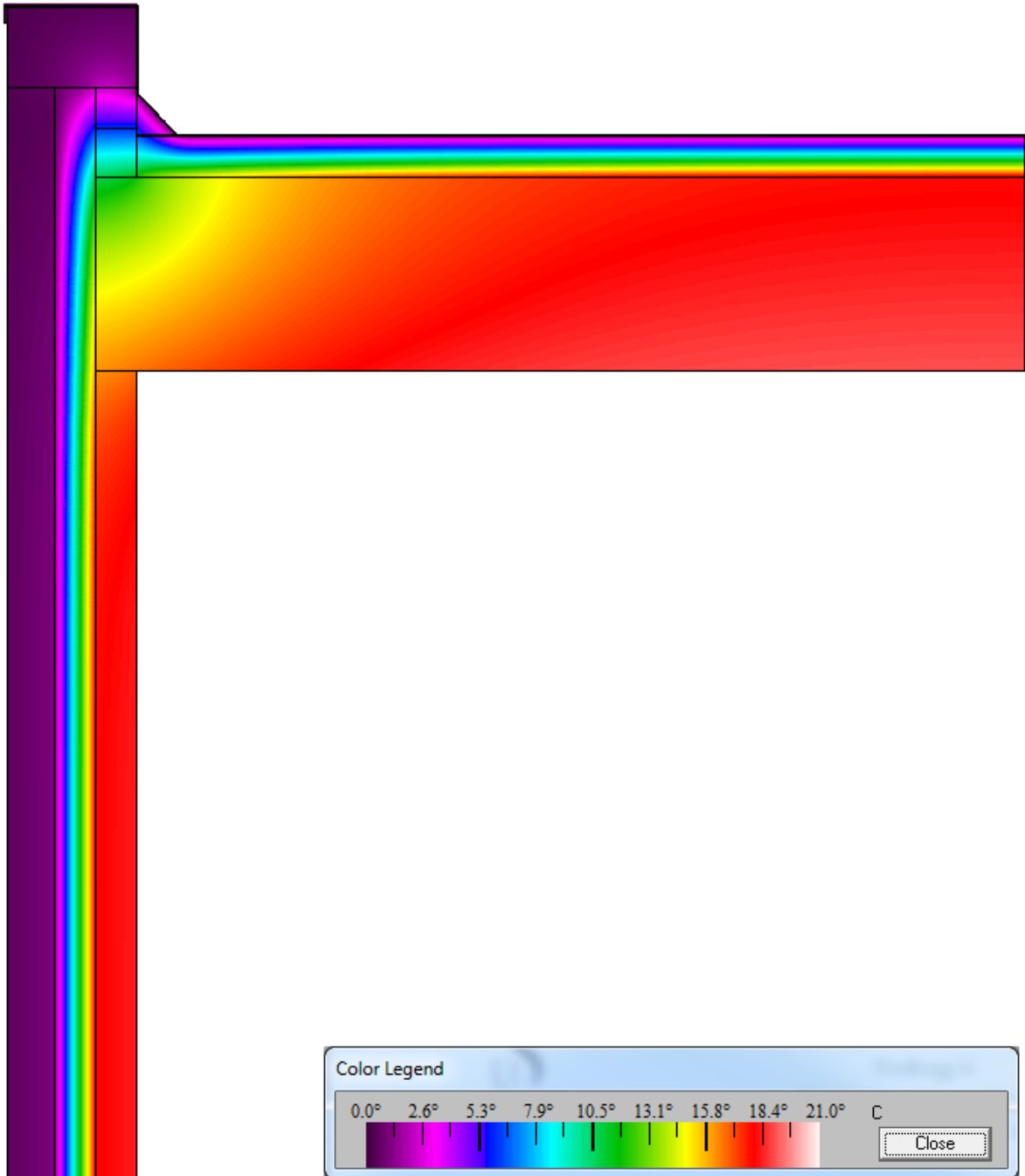


KULDEBROER VED TAK

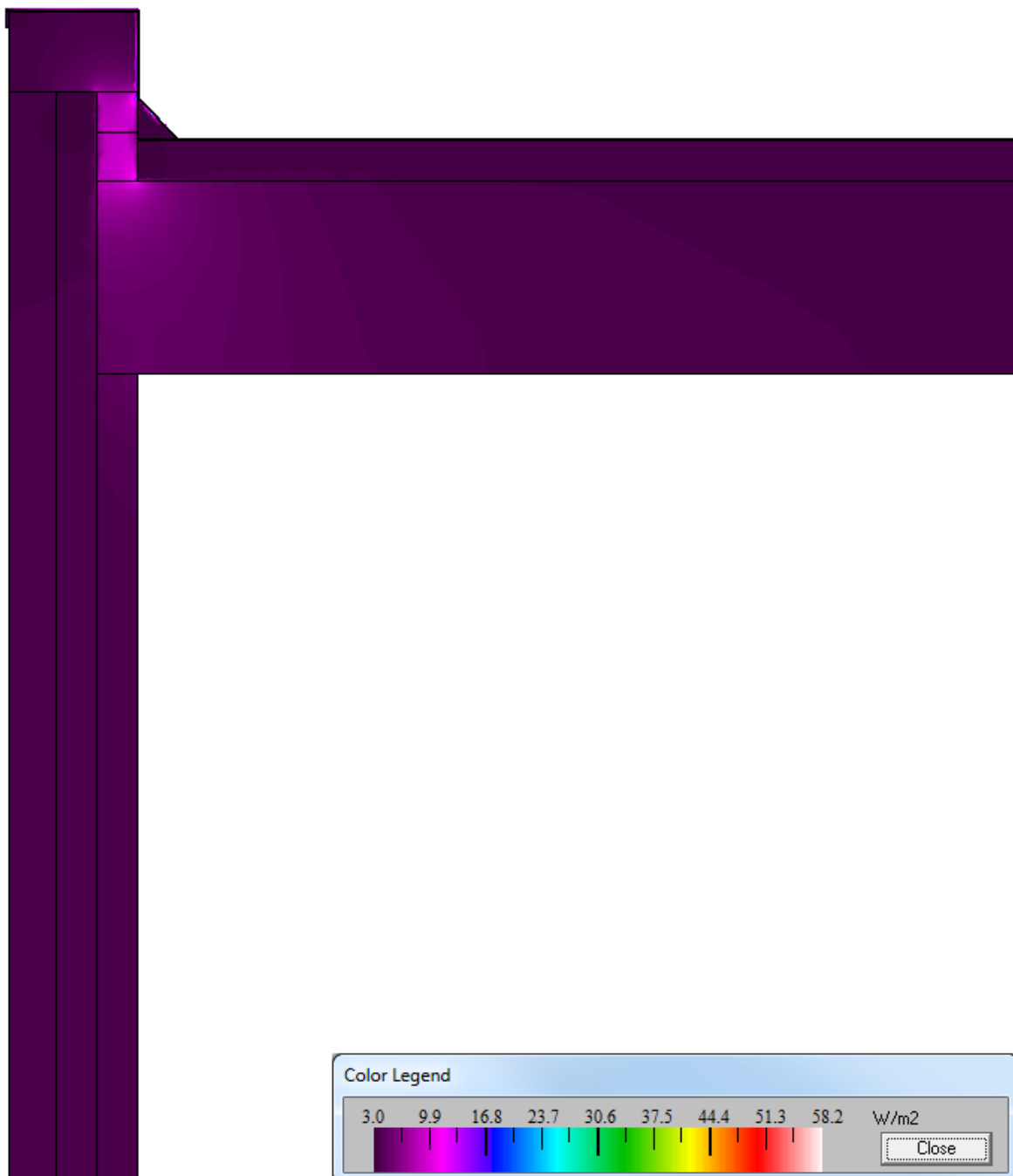
**Tak - Vegg
Materialer**



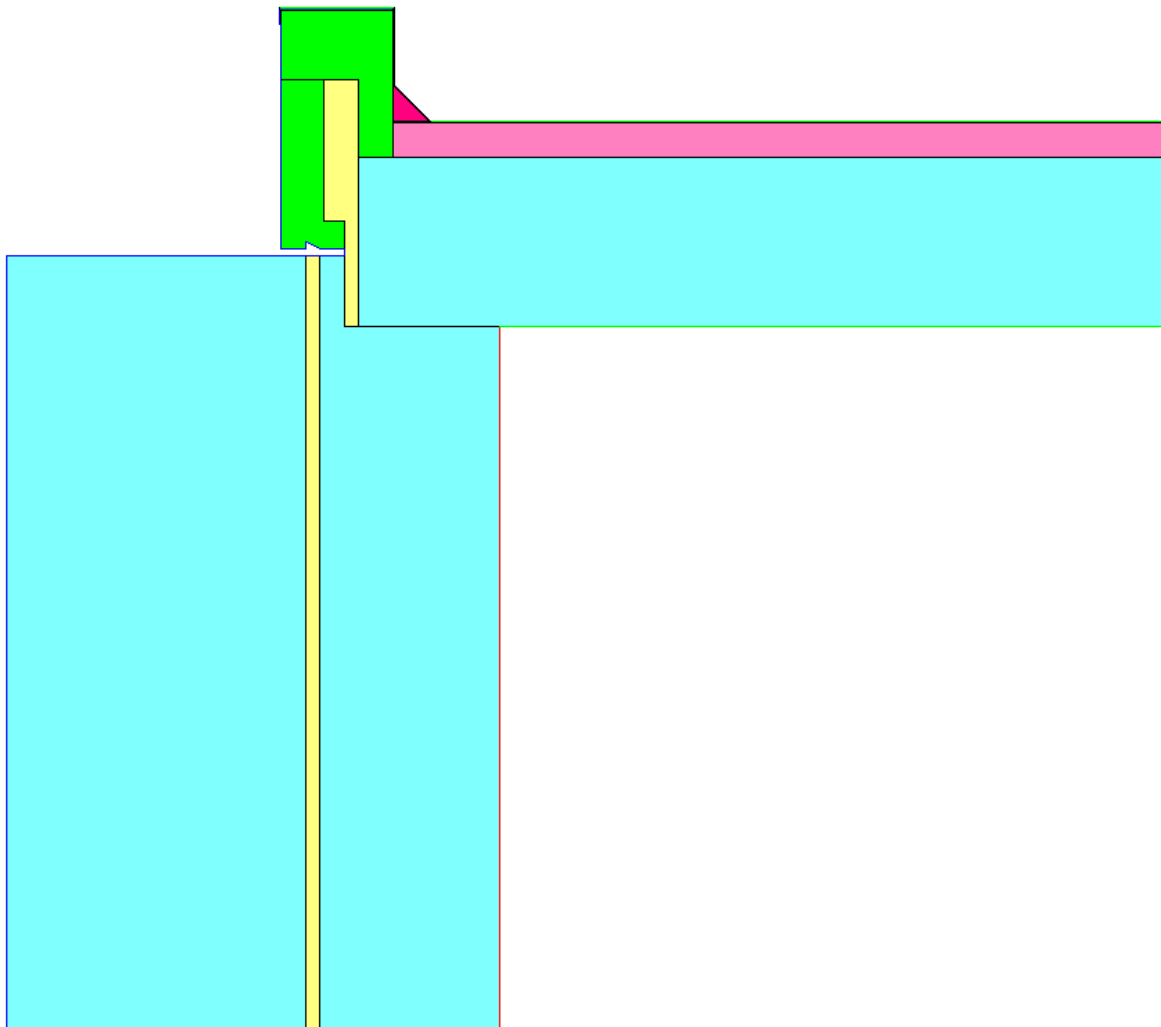
Tak - Vegg
Temperaturfordeling



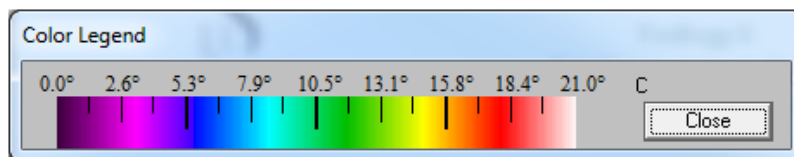
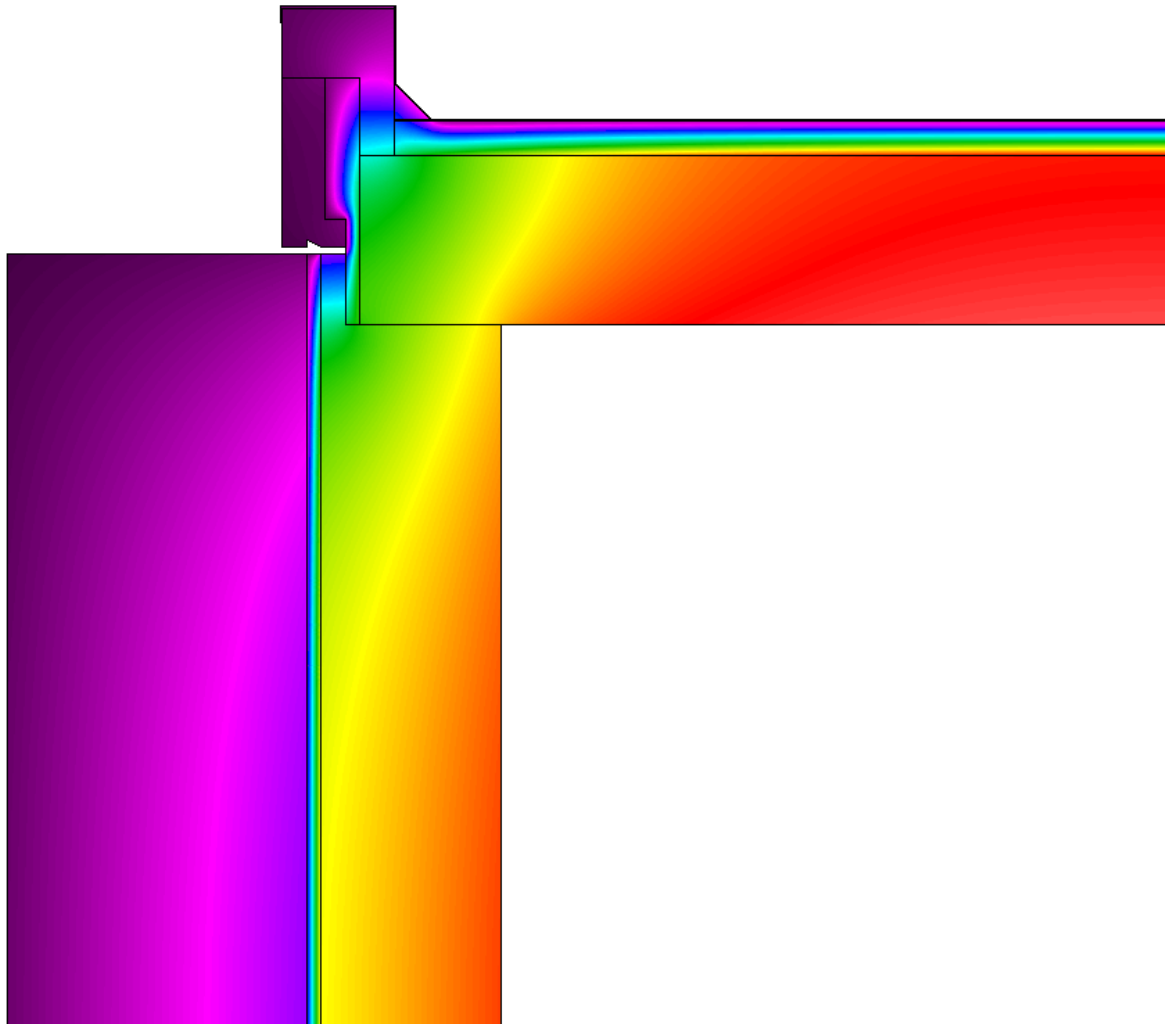
Tak - Vegg
Flukstetthet



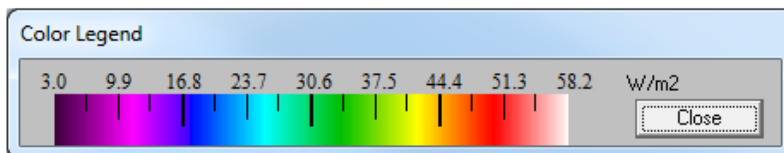
**Tak - Ribbe
Materialer**



Tak - Ribbe
Temperaturfordeling

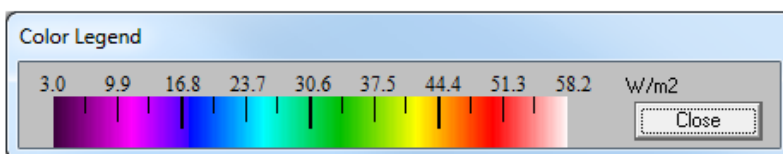
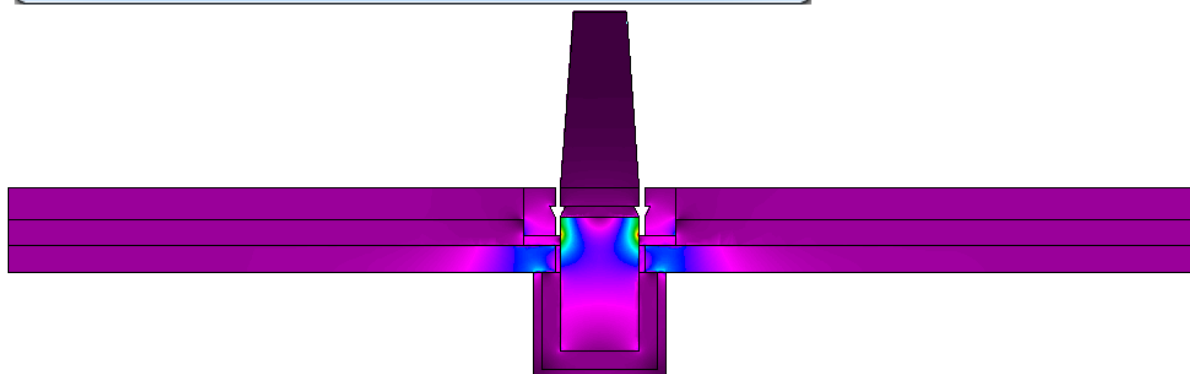
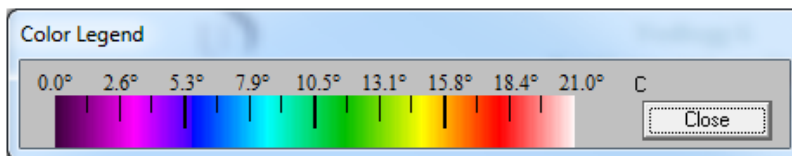
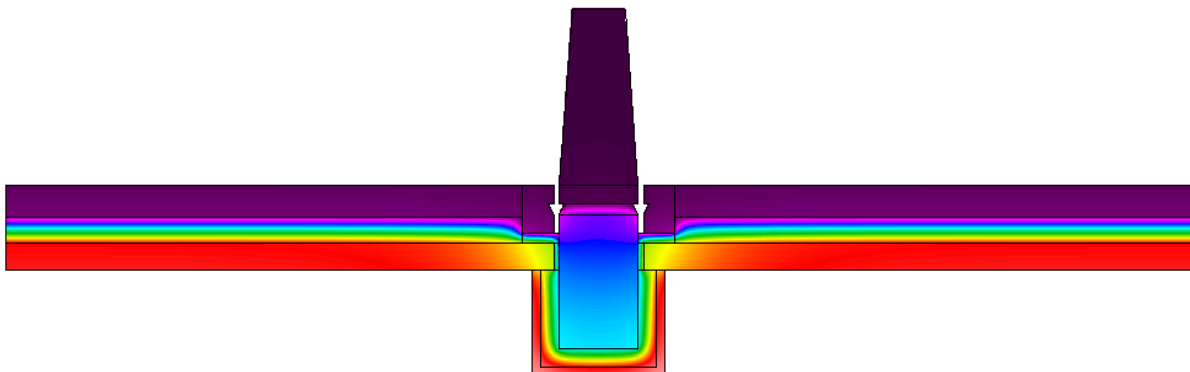
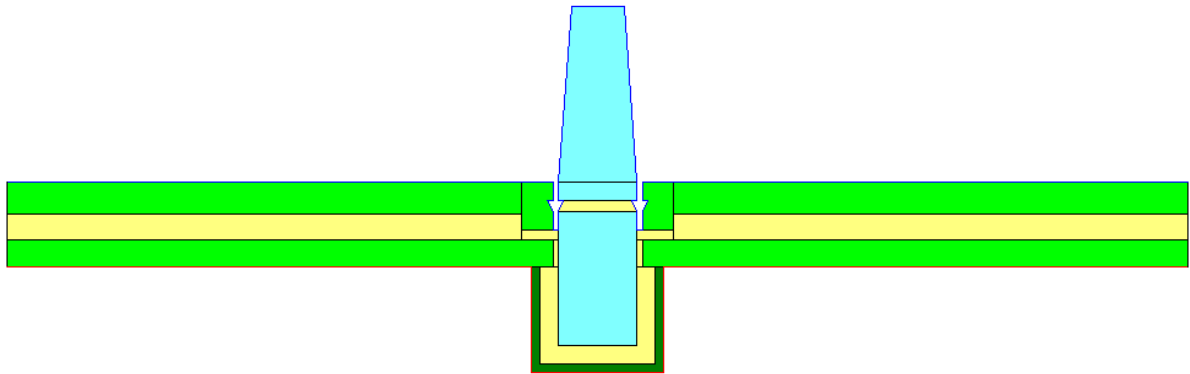


Tak - Ribbe
Flukstetthet

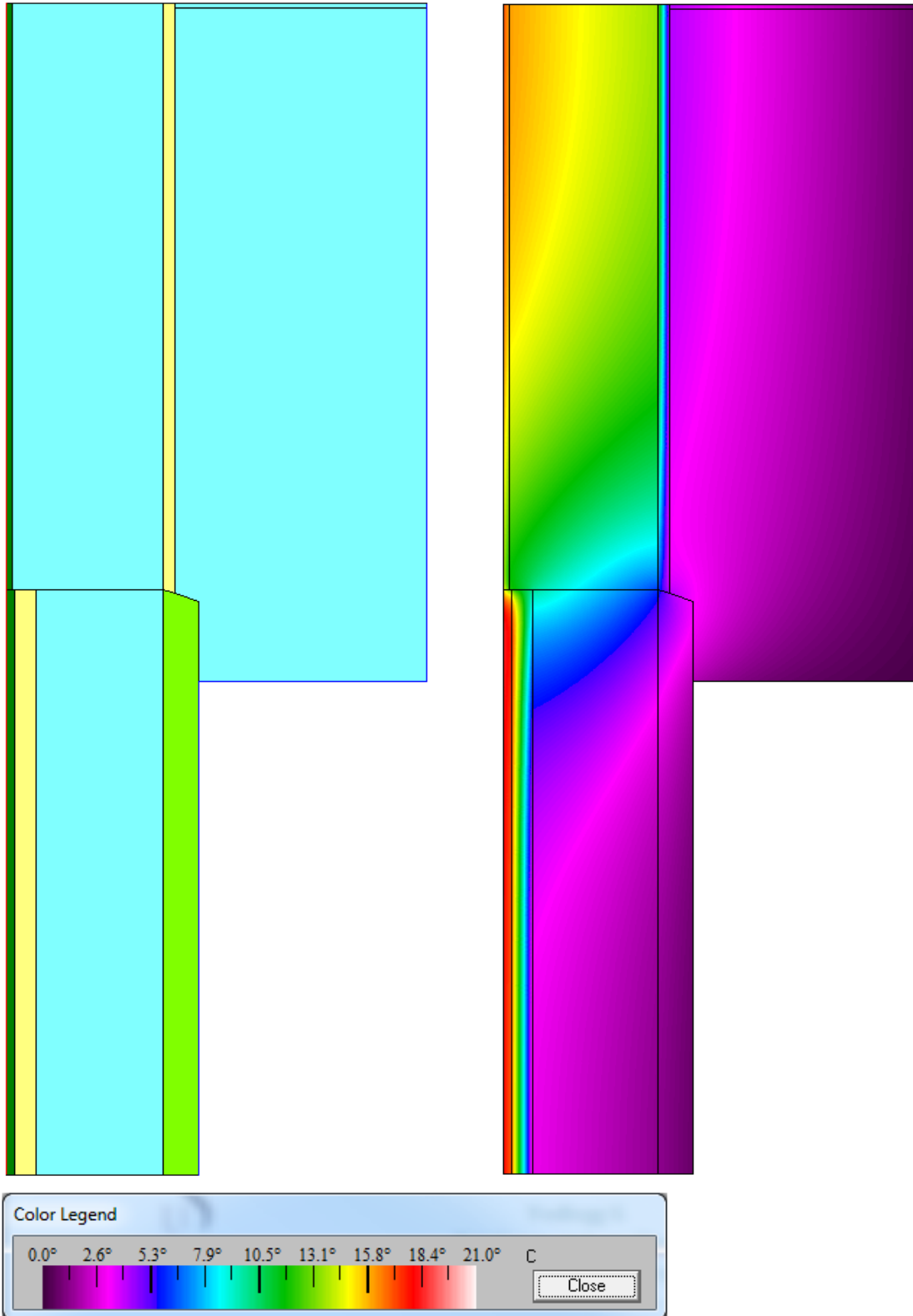


KULDEBROER VED RIBBER

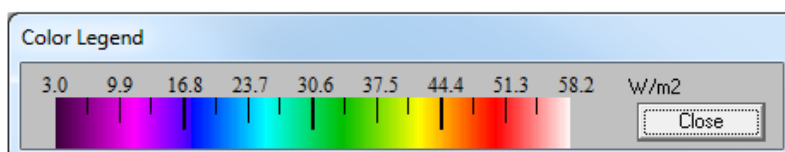
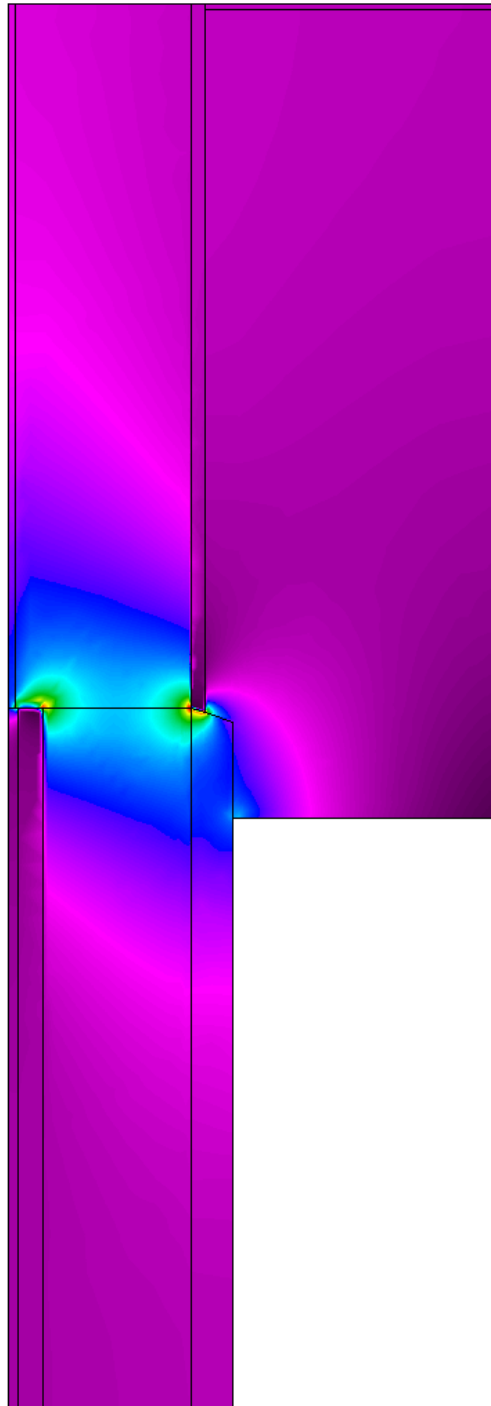
Total kuldebro Ribbe - Vegg
Materialer, Temperaturfordeling, Flukstetthet



Enden på ribbe, andre etasje
Materialer, Temperaturfordeling

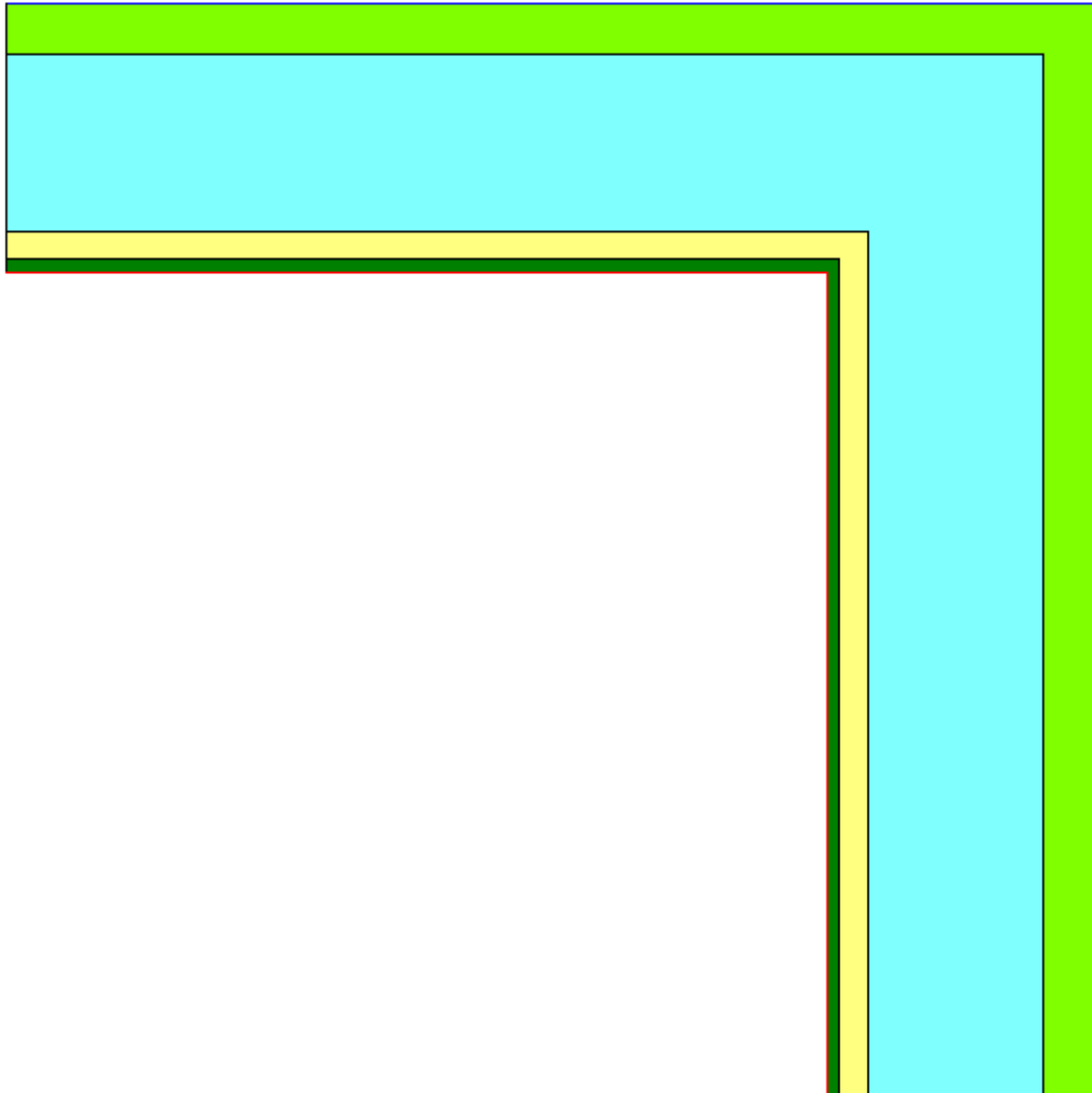


Enden på ribbe, andre etasje
Flukstetthet

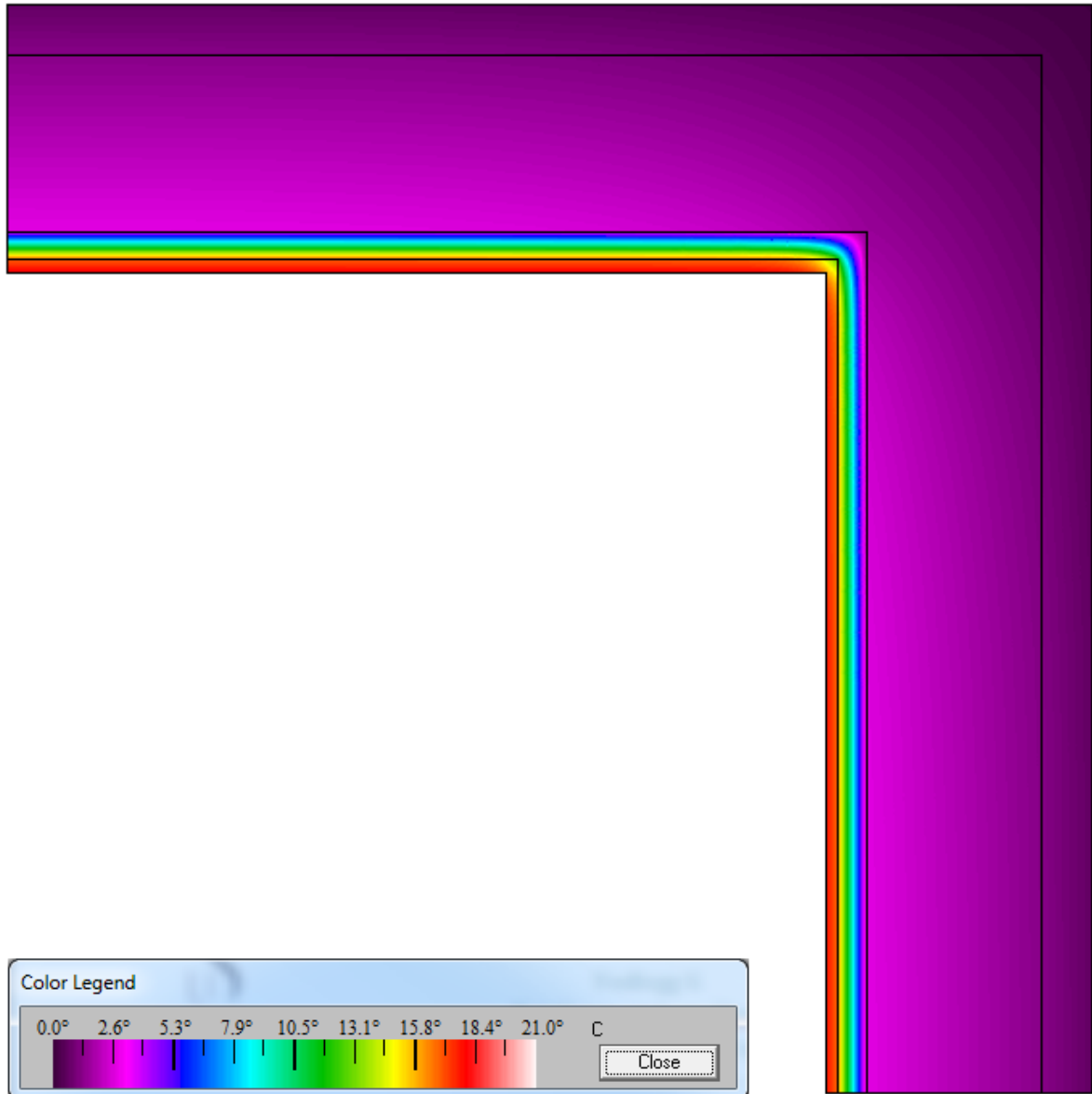


KULDEBROER VED HJØRNER

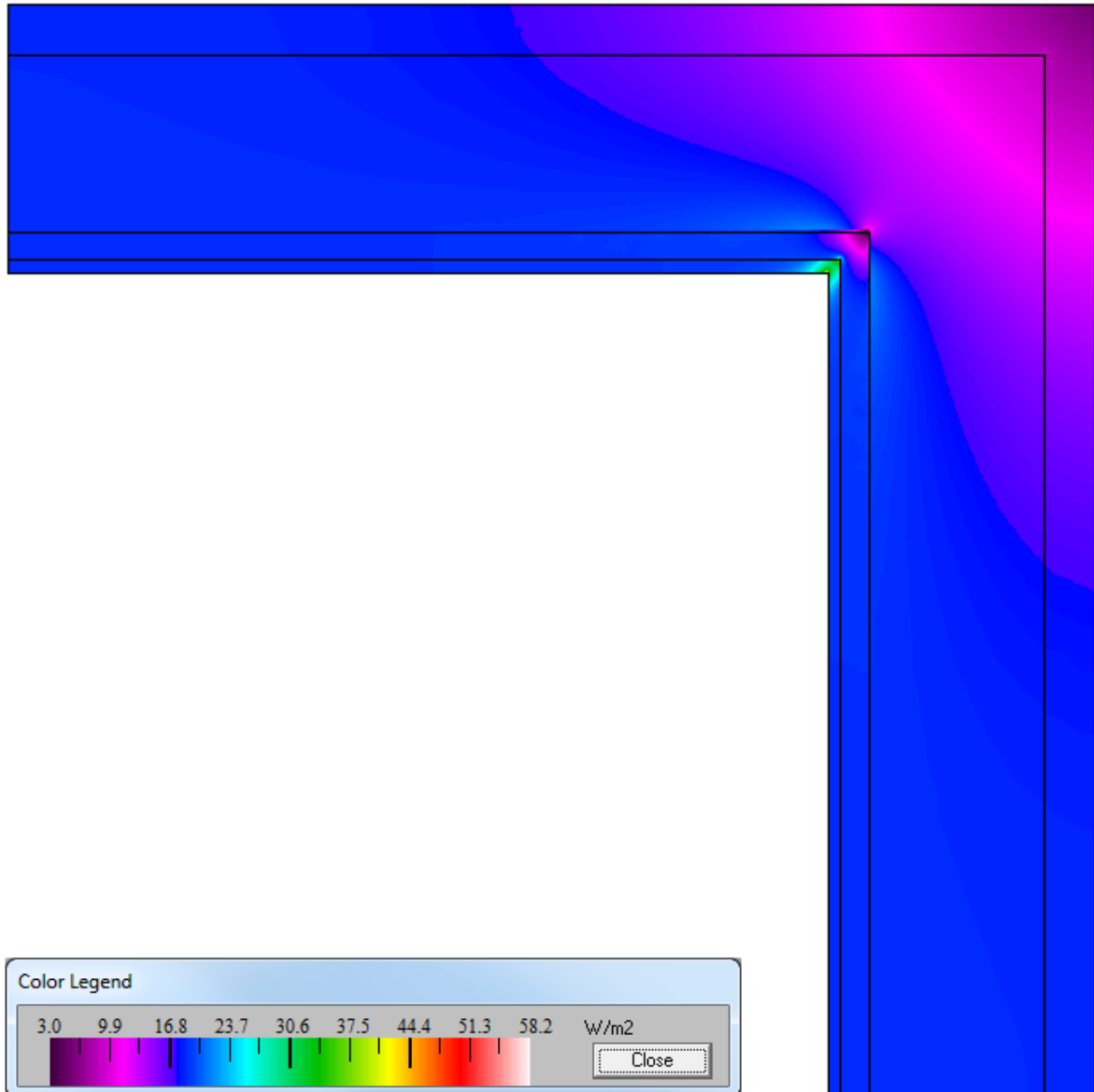
**Hjørner i andre etasje
Materialer**



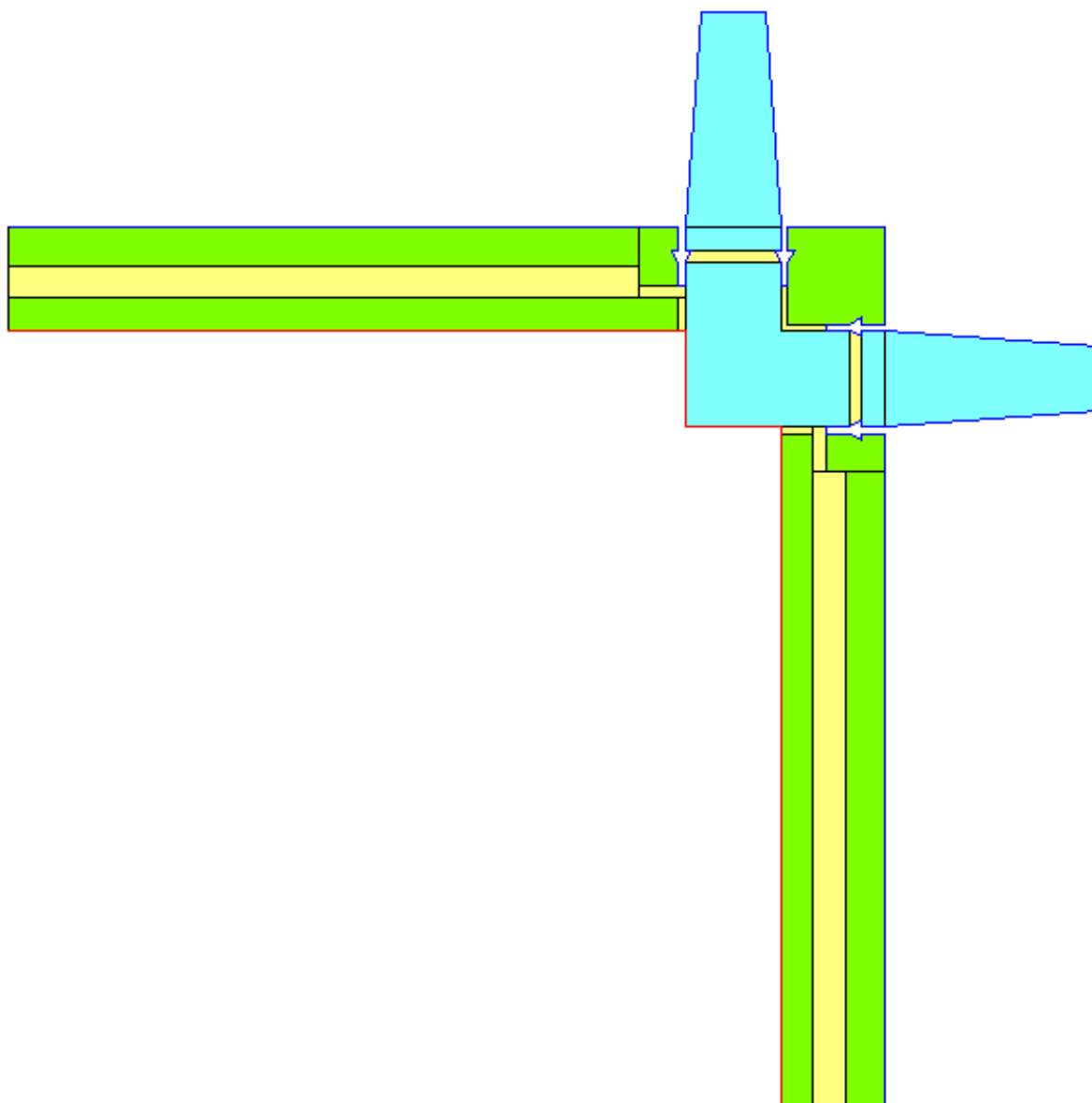
Hjørner i andre etasje
Temperaturfordeling



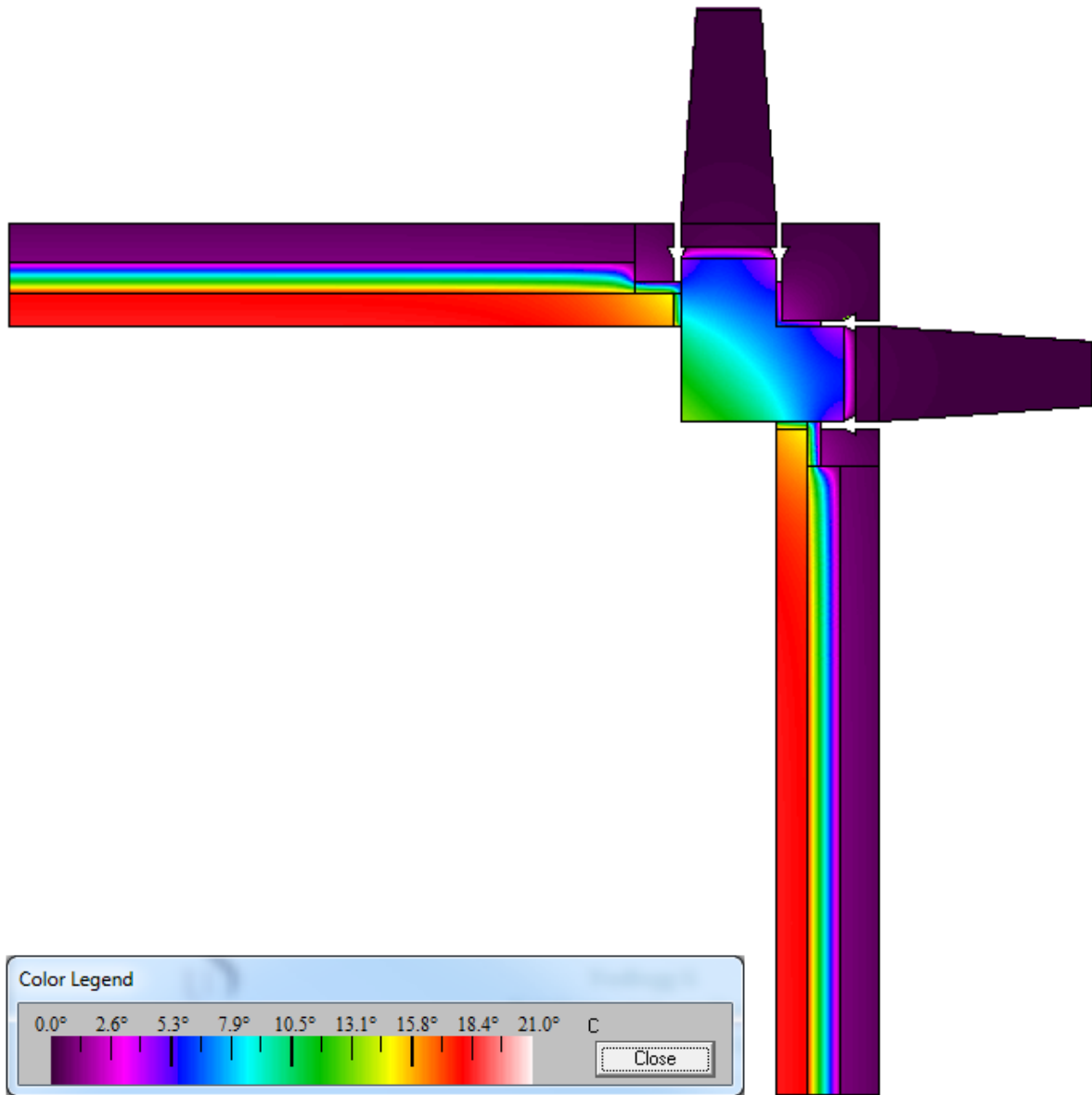
Hjørner i andre etasje
Flukstetthet



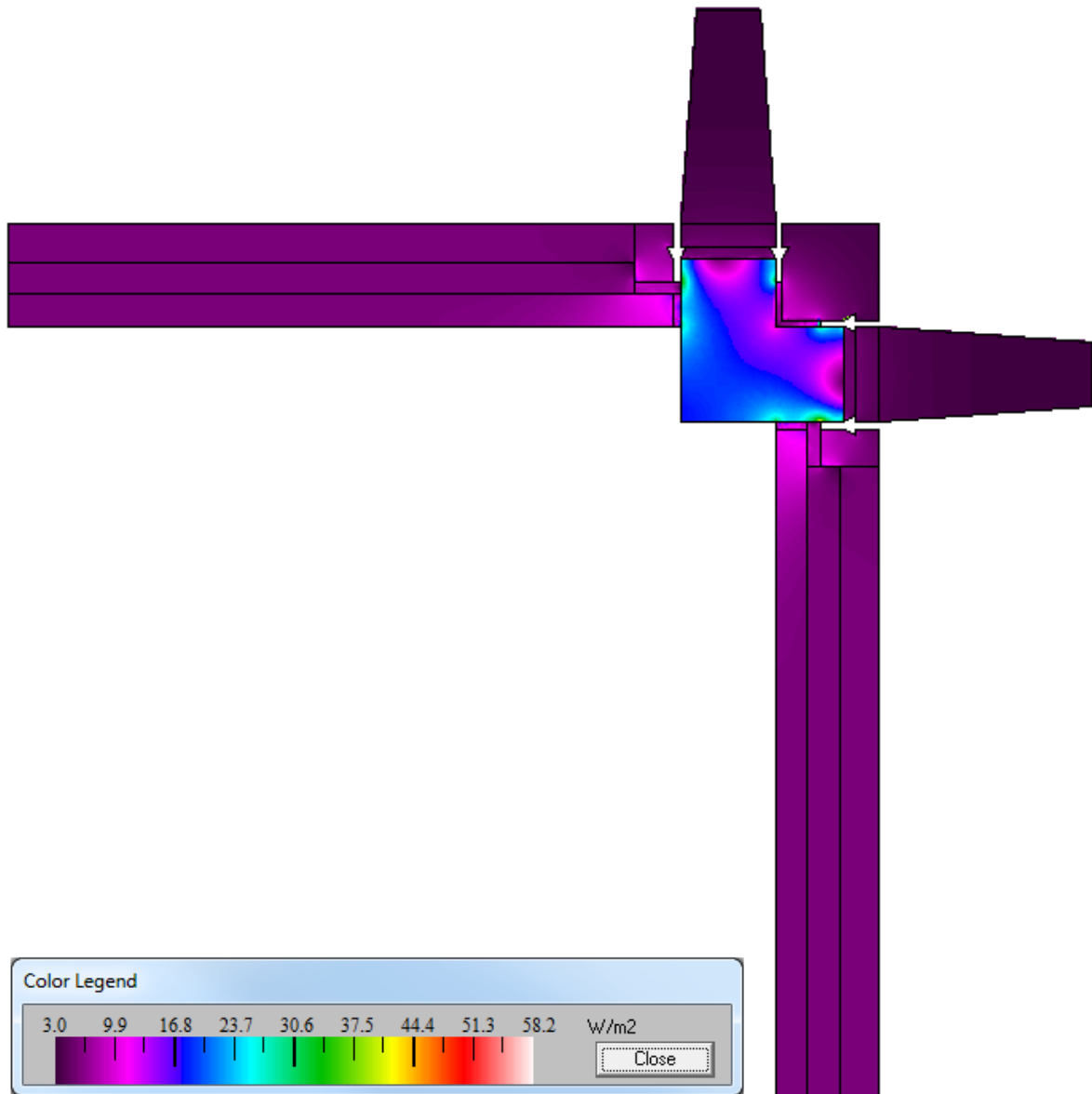
Hjørne bestående av to ribber
Materialer



**Hjørne bestående av to ribber
Temperaturfordeling**

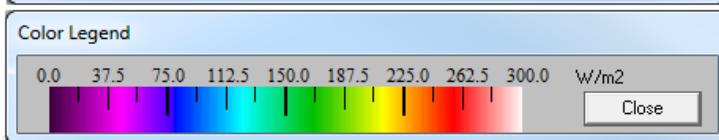
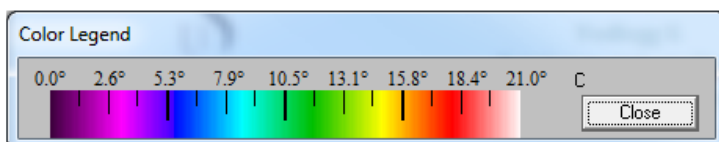
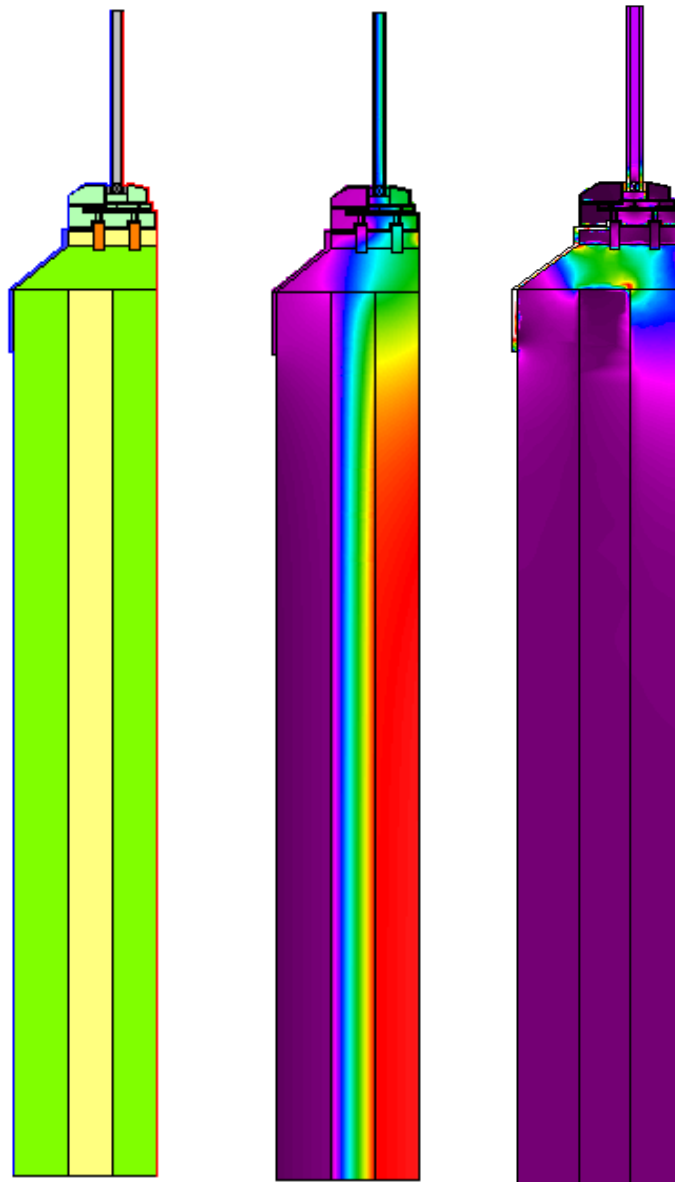


Hjørne bestående av to ribber
Flukstetthet

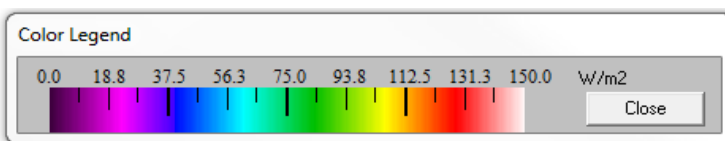
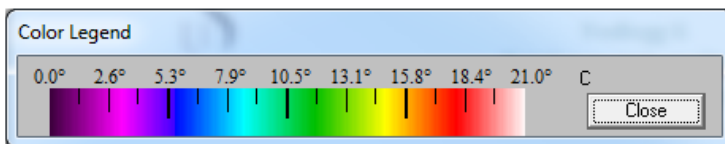
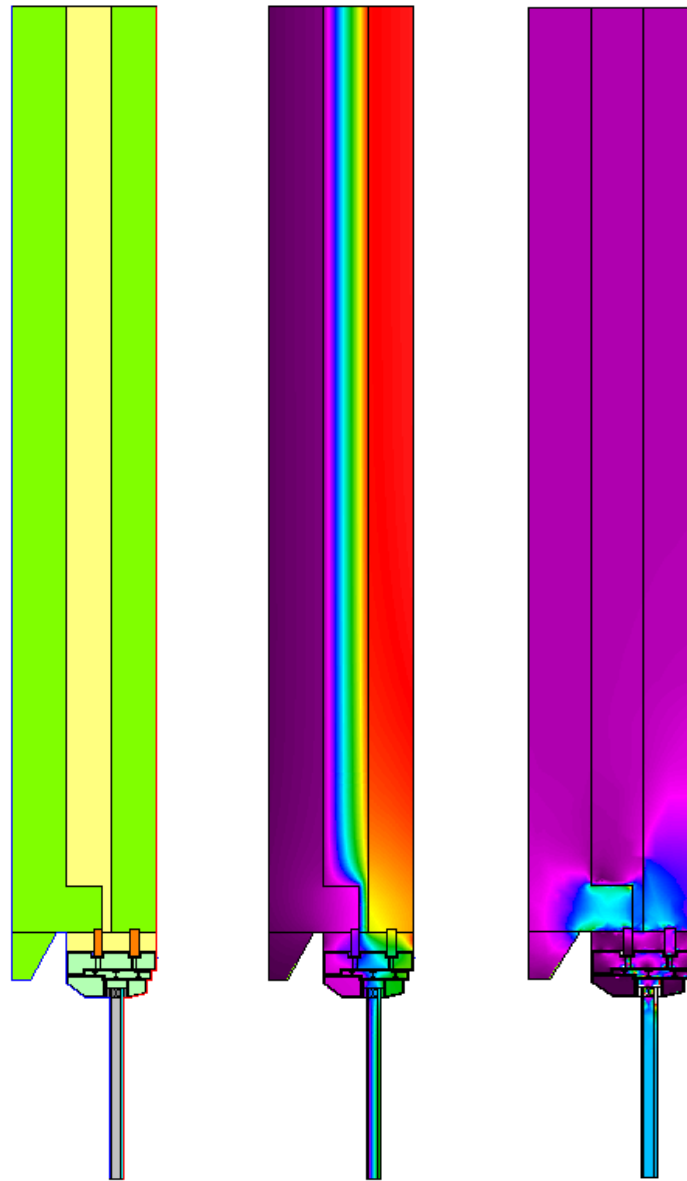


KULDEBROER VED VINDUER

Vegg - Vinduets underkant
Materialer, Temperaturfordeling, Flukstetthet

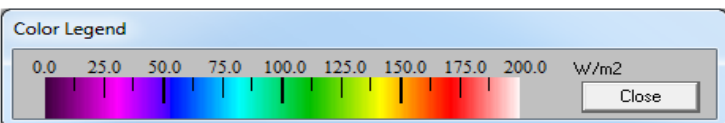
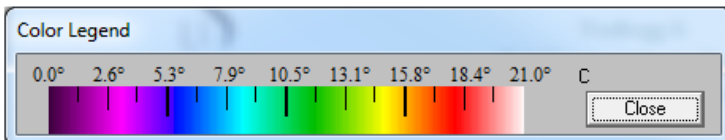
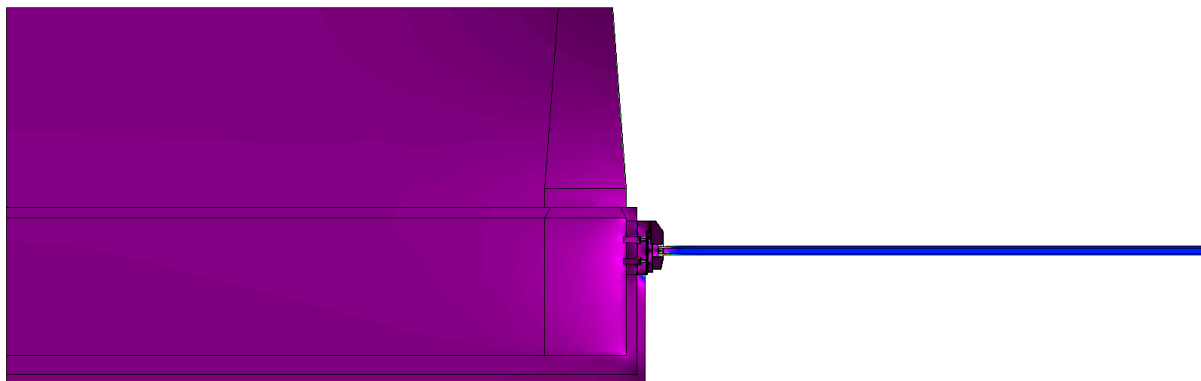
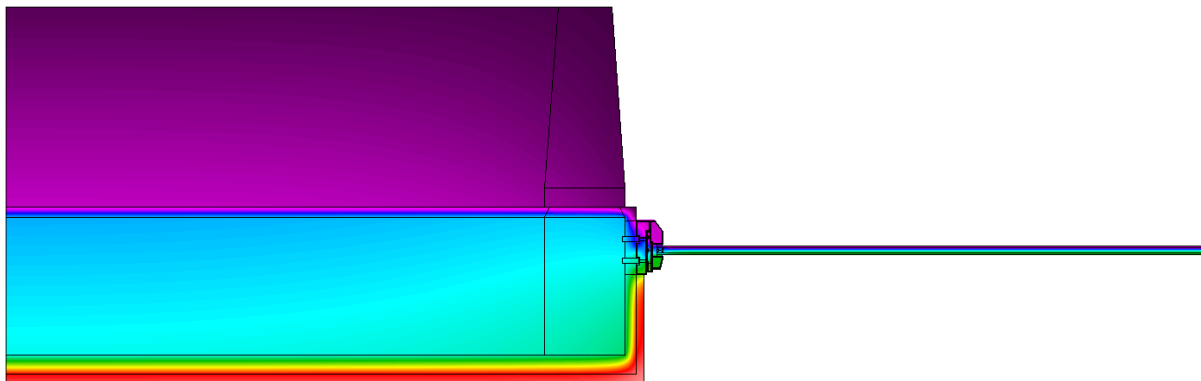
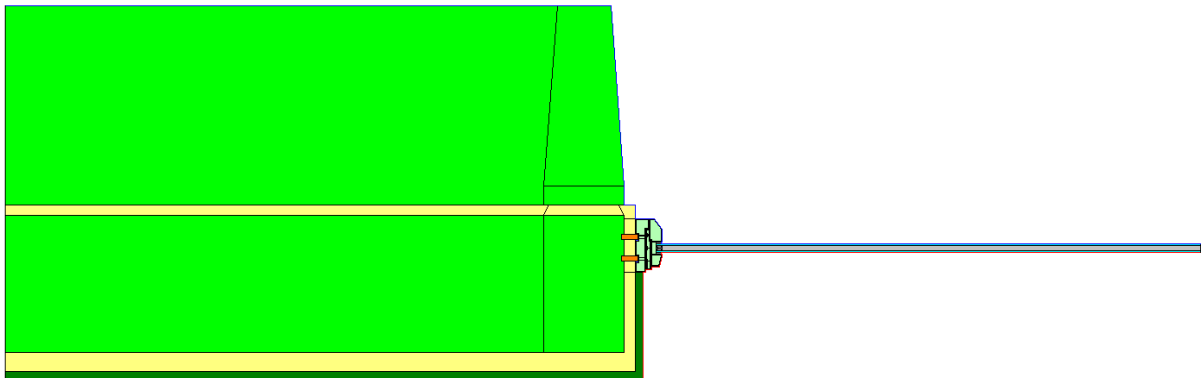


materialer, temperaturfordeling, flukstetthet











Overgang Ribbe - Vindu (kun vindu på en side)
Materialer, Temperaturfordeling, Flukstetthet

Vedlegg G
Detaljer modellert i Therm
(Materialer, temperaturfordeling og flukstetthet)



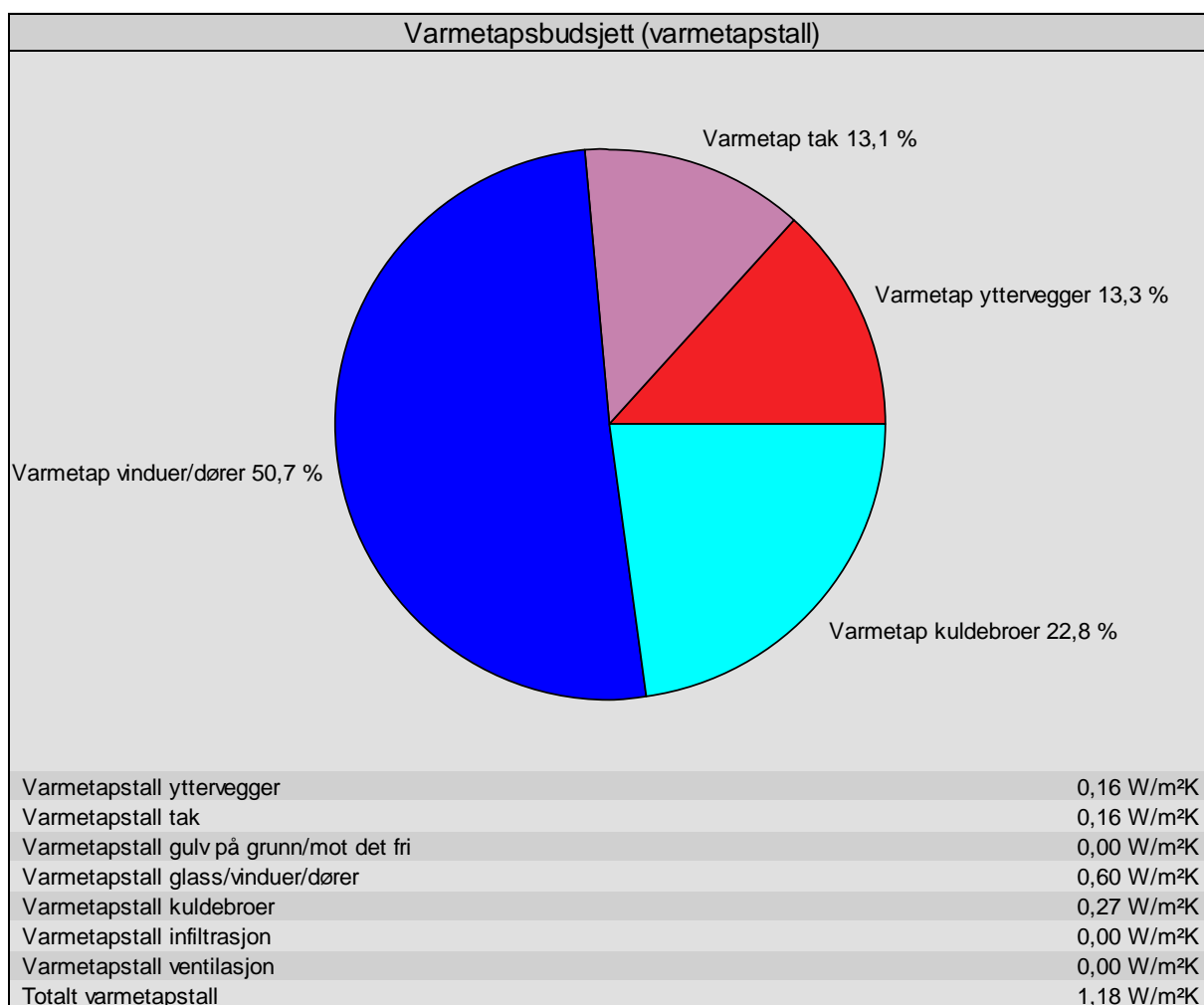
Oversikt over hvilke farger som indikerer ulike materialer

Vedlegg G
Detaljer modellert i Therm
(Materialer, temperaturfordeling og flukstetthet)

Farge i Therm	Materiale	Konduktivitet, λ
	Armert betong	2,30 W/(mK)
	Uarmert betong	1,65 W/(mK)
		
	Isolasjon	0,04 W/(mK)
	Isolasjon, skumplast	0,03 W/(mK)
		
	Gips	0,20 W/(mK)
	Taktekking	0,03 W/(mK)

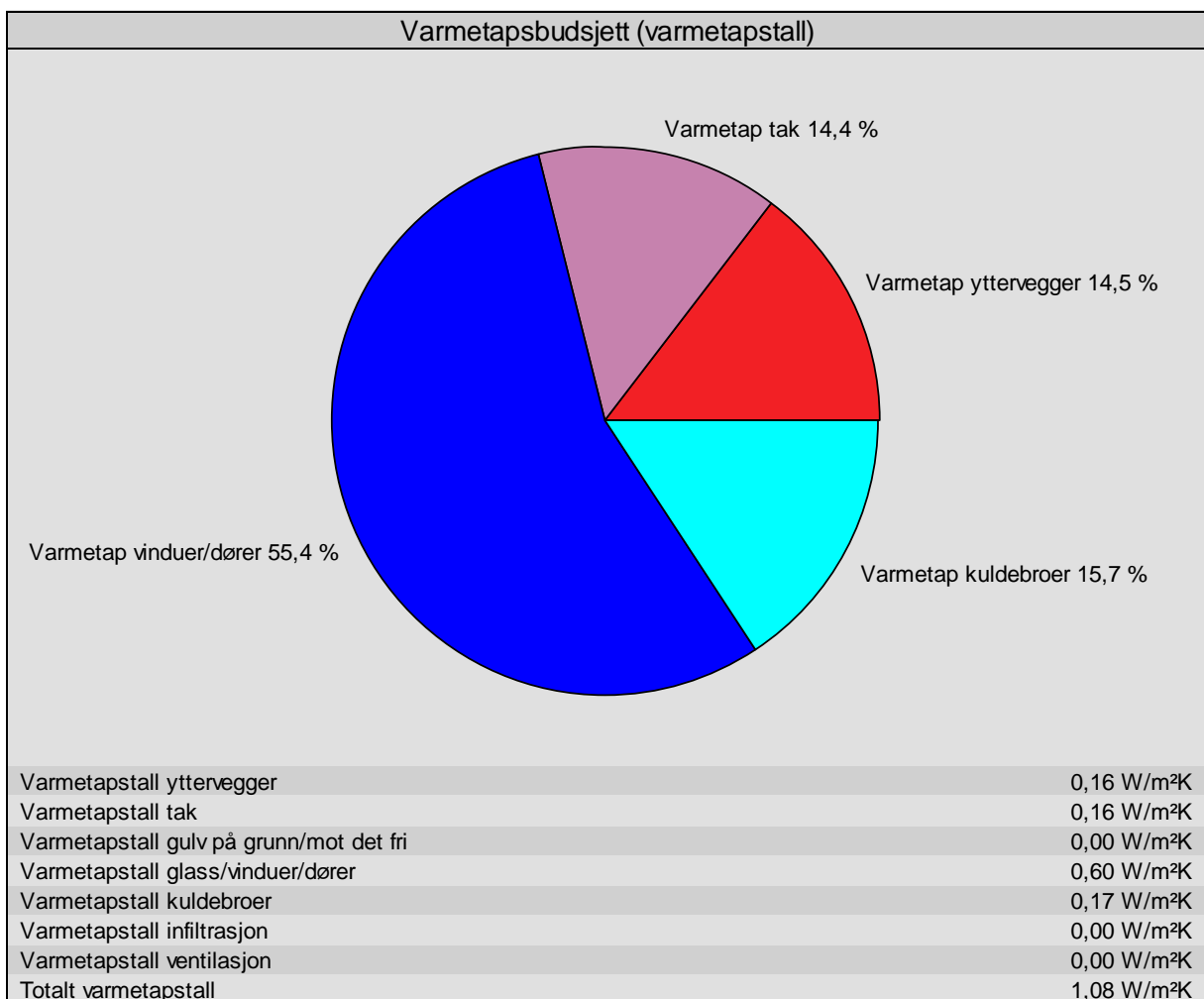
Basert på beregnede normalverdier for kuldebroer

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	318487 kWh	99,8 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3a Vifter	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3b Pumper	0 kWh	0,0 kWh/m ²
4 Belysning	0 kWh	0,0 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6a Romkjøling	2672 kWh	0,8 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	321159 kWh	100,7 kWh/m²



Basert på beregnede minimumsverdier for kuldebroer

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	292134 kWh	91,6 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3a Vifter	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3b Pumper	0 kWh	0,0 kWh/m ²
4 Belysning	0 kWh	0,0 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6a Romkjøling	3238 kWh	1,0 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	295372 kWh	92,6 kWh/m²



Basert på beregnede maksimumsverdier for kuldebroer

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	344059 kWh	107,8 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3a Vifter	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3b Pumper	0 kWh	0,0 kWh/m ²
4 Belysning	0 kWh	0,0 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6a Romkjøling	2234 kWh	0,7 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0 kWh	0,0 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	346293 kWh	108,5 kWh/m²

