



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp.
Fakultetet for realfag og teknologi

Kuldebroer ved vindusinnsetting

Thermal Bridges for Window-to-Wall Connections

Gunvor Hov Høydal
Byggeteknikk og arkitektur

FORORD

Masteroppgaven «Kuldebroer ved vindusinnsetting» er avsluttende oppgave av det femårige sivilingeniørstudiet Byggeteknikk og Arkitektur ved fakultetet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, NMBU. Oppgave er planlagt og skrevet våren 2019 og tilsvarer 30 studiepoeng.

Temaet i oppgaven omhandler varmetap som oppstår ved kuldebroer i tilslutninger mellom vindu og vegg. Ulike aksepter knyttet til kuldebroer ved vindusinnsetting blir diskutert med mål å finne en optimal løsning for vinduets posisjon i vegglivet. Motivasjonen for å skrive oppgaven kom av interessen for å bygge miljøvennlig og utfordringer knyttet til bygningsfysiske problemer.

Jeg ønsker å takke vindusprofilprodusenten Schüco for oppgaven og veiledning fra Tomasz Zamrzycki ved bruk av programvare for varmestrømsberegninger. Videre vil jeg takke hovedveileder Tormod Aurlien ved NMBU for innspill og rådføring rundt oppgaven.

Ås, 15. mai 2019

Gunvor Hov Høydal

SAMMENDRAG

Det bygges mer energieffektive bygninger med konstruksjoner med økt isolasjonstykkelse, tettere bygningskropp og ventilasjonssystem med høy varmegjenvinning. Det gjøres ofte uten at flere potensielle byggetekniske utfordringer er utredet. For å unngå skader eller byggetekniske feil under eller etter ferdigstilling, er det viktig at byggetekniske detaljer er diskutert og løst før de bygges.

I overgang mellom bygningsdetaljer med ulike termiske egenskaper oppstår det et ekstra varmetap som kalles kuldebro. Denne oppgaven tar for seg kuldebroer som oppstår i tilslutning mellom vindu og vegg. Kuldebro ved vindusinnsetting kan stå for et stort varmetap sammenliknet med andre kuldebroer i et bygg, og kan utgjøre en stor del av varmetapet i en bygning. Det er derfor nødvendig å ta stilling til kuldebroene tidlig i prosjekteringsfasen. Faktorer som påvirker kuldebro ved vindusinnsetting er bruk av materialer, geometrier i bygningsdetalj og utførelsen på byggeplass.

Målet med oppgaven er å finne ut om numerisk beregning av kuldebroverdier kan verifiseres med temperaturmålinger. Det er også et mål å finne ut hvordan plassering av vindu i vegglivet påvirker kuldebroeffekten i bygg for vinduer med ramme- og karmprofil i aluminium. Videre er det å finne ut om etterisolering som tiltak vil påvirke kuldebro ved vindusinnsetting. Det er også spørsmål om det kan designes en standard plassering av vindu i vegglivet for et optimalt energieffektivt bygg.

For å komme frem til målene i oppgaven ble det gjennomført feltarbeid og modellering. To næringsbygg ble valgt med vinduer med ramme- og karmprofil i aluminium. Gjennom feltarbeid ble kuldebro ved vindusinnsetting kartlagt gjennom termografering og temperaturmålinger. Det viser seg at det til en viss grad er mulig å verifisere kuldebroverdier fra varmestrømsberegninger med temperaturmålinger.

Ved modellering ble kuldebroverdier beregnet for ulike vindusposisjoner i vegglivet og etter alternative tiltak. En midtstilt eller noe inntrukket plassering av vindu i vegglivet, viser seg å være den beste posisjonen av et vindu for å minimere kuldebroverdi. En helt uttrukket eller inntrukket vindusinnsetting vil begge gi høyere kuldebroverdier. Sammenliknet med studier av trevinduer, tyder dette på at vinduer i aluminium gir lignende kuldebroer som for trevinduer. Etterisolering av vegg uten forbedring av vindu vil føre til økte kuldebroverdier. Likevel kan det totale varmetapet fra en bygning kunne reduseres ved etterisolering av vegg

selv om kuldebroeffekten ved vindusinnsetting øker. Innvendig isolering av ramme- og karmprofil vil som regel redusere kuldebroverdi, men kan gi økt risiko for fuktproblemer i konstruksjon.

ABSTRACT

More energy efficient buildings are constructed with increased thickness of insulation, denser building body and ventilation system with high heat recovery. This is often done without examination of other potential challenges regarding the building technics. To avoid damage or technical defects in buildings during or after completion, it is important that building technical details are discussed and resolved before they are constructed.

In the transition between building details with different thermal properties, an extra heat loss occurs, which is called thermal bridge. This thesis deals with thermal bridge that occurs in connection between the window and the wall. The thermal bridge around windows can stand for a large heat loss compared to the other thermal bridges in a building, and the thermal bridge may be a large part of the total heat loss in a building. Therefore, is it necessary to consider the thermal bridges early in the design phase. Factors that affect the thermal bridge around window are use of materials, geometries in building details and the craftsmanship on site.

The aim of the thesis is to find out whether numerical calculation of linear thermal transmittance can be verified with temperature measurements. It is also a goal to find out how the positioning of the window with frame profiles in aluminum affects the thermal bridging in buildings. Furthermore, effects on thermal bridges from post-insulation as a measure is studied. A question is whether a standard window position can be designed for an optimum energy efficient building.

Field work and modeling are carried out to achieve the objectives of the thesis. Two commercial buildings are/were chosen with windows with aluminum frame profiles. Through the field work, the thermal bridge around windows were mapped through thermography and temperature measurements. The study turns out that to a certain extent, it is possible to verify linear thermal transmittance from heat flow calculations with temperature measurements.

In modeling, linear thermal transmittance values were calculated for different window positions and for alternative measures. A position of window centered or slightly retracted in the window opening proves to be the best position to minimize linear thermal transmittance. A window positioned at the outer or inner margin of the window opening will both provide higher linear thermal transmittance. Compared with other studies of wooden windows, the study indicates that windows in aluminum give similar thermal bridges as wooden windows.

Wall insulation without window improvement will result in increased linear thermal transmittance. Nevertheless, the total heat loss from a building can be reduced by post-insulation of the wall even though the thermal bridge effect increases. Interior insulation of the frame profile will often reduce linear thermal transmittance, but could increase the risk of moisture problems in the construction.

INNHOLDSFORTEGNELSE

FORORD.....	I
SAMMENDRAG.....	III
ABSTRACT.....	V
INNHOLDSFORTEGNELSE.....	VII
FIGURLISTE.....	X
TABELLISTE.....	XIII
1 INNLEDNING.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Oppgavebeskrivelse.....	3
2 TEORI.....	5
2.1 Definisjoner.....	5
2.2 Krav.....	13
2.2.1 Normalisert kuldebroverdi.....	13
2.3 Kuldebroer.....	14
2.3.1 Konsekvenser av kuldebroer.....	16
2.4 Beregning av kuldebroer.....	18
2.4.1 Grovestimering.....	18
2.4.2 Tabelloppslag.....	19
2.4.3 Manuell beregning.....	19
2.4.4 Numerisk beregning.....	19
2.6 Måling og registrering av kuldebroer.....	22
2.6.1 Laboratoriemålinger.....	22
2.6.2 Temperaturmåling i felt.....	23
2.6.3 Termografering.....	24
2.7 Kulebro ved vindusinnsetting.....	27
2.7.1 Beregningsgrunnlag.....	28
2.7.2 Faktorer som kan påvirke kuldebro ved vindusinnsetting.....	29
2.7.3 Tiltak for å redusere varmetap.....	38
3 METODE.....	41
3.1 Feltarbeid.....	43
3.1.1 Måleutstyr.....	43

3.1.2 Fremgangsmåte	45
3.1.3 Feilkilder ved feltarbeidet	52
3.2 Modellering	55
3.2.1 WinIso2D	55
3.2.2 Fremgangsmåte	55
3.2.3 Forutsetninger	58
3.2.4 Beregningsforutsetninger	63
3.2.5 Feilkilder ved modellering	65
3.3 Behandling av data fra feltarbeid og modellering	66
4 RESULTATER	67
4.1 Campus Ås.....	67
4.1.1 Målt temperatur.....	67
4.1.2 Termografering	69
4.1.3 Modellresultat	70
4.2 Sørhellinga.....	73
4.2.1 Målt temperatur.....	73
4.2.2 Termografering	75
4.2.3 Modellresultat	76
5 DISKUSJON	79
5.1 Målte temperaturer	79
5.1.1 Campus Ås	79
5.1.2 Sørhellinga	80
5.2 Termografering	83
5.2.1 Campus Ås	83
5.2.2 Sørhellinga	84
5.3 Modellering	86
5.3.1 Campus Ås	86
5.3.2 Sørhellinga	91
5.4 Sammenstilling modellresultat Campus Ås og Sørhellinga	95
5.5 Krav	97
5.6 Beregning av U-verdi og kuldebroverdier.....	98
6 KONKLUSJON	101
7 FORSLAG TIL FORBEDRING OG VIDERE ARBEID.....	103
REFERANSER	105
VEDLEGG	107

A Termogrammer	108
B Modeller av etterisolering av innside vegg og karm- og rammeprofil	111
C Beregning av kuldebroverdi.....	113
D Varmestrømsberegninger.....	115

FIGURLISTE

Figur 1 Eksempel på hvordan totalt varmetap fra en konstruksjonsdel beregnes. Det totale varmetapet er summen av varmetapet gjennom veggen og varmetap fra kuldebroer (Byggdetaljer 471.015, 2008).....	12
Figur 2 Kuldebro som oppstår på grunn av materiale med høyere varmekonduktivitet trenger inn i yttervegg. Isolasjonssjiktet i forkant av kuldebroen er et eksempel på en kuldebroer (Byggdetaljer 471.015, 2008).....	14
Figur 3 Kuldebro som oppstår på grunn av endring i tykkelse av materiale (Byggdetaljer 471.015, 2008).....	15
Figur 4 Geometrisk kuldebro som oppstår på grunn av forskjell på innvendig og utvendig areal av konstruksjonen (Byggdetaljer 471.015, 2008).....	15
Figur 5 Illustrasjon av ulike kuldebroer med plassering i bygningskroppen. Hver av bokstavene står for forskjellige kuldebroer som normalt finnes i en bygning. Vindusfuger(W), hjørner (C), gesims (R), etasjeskiller mot ytterfasade (IF), innervegg mot ytterfasade (IW), sokkel (GF), bæresøyler-/bjelker i vegg (P) og balkong-/ solavskjermingsinnfesting (B) (NS-EN ISO 14683:2017, 2017).....	16
Figur 6 Isoterm av vindusinnsetting. Fargene står for ulike temperaturer i konstruksjonen....	21
Figur 7 Kuldebro som oppstår ved vindusinnsetting. Det er både materialtykkelsen og -bruken som forårsaker kuldebroen (SINTEF Byggforsk, 2009).....	27
Figur 8 Avgrensninger av innvendig mål ved beregning av kuldebroer ved vindusinnsetting (SINTEF Byggforsk, 2008).....	28
Figur 9 Rute med tre lags glass og avstandslister mellom glassene (Byggdetaljer 571.953, 2016).....	30
Figur 10 Oppbygning av aluminiumsvindu. Vinduet er åpningsbart og slår innover (Byggdetaljer 533.151, 2016).....	33
Figur 11 Ulike vindusinnsettinger av trevindu i vegg av bindingsverk av tre med tilhørende kuldebroverdier (Byggdetaljer 471.015, 2008).....	37
Figur 12 Oversiktskart over bygningsmassen på Campus Ås og plassering av gjennomført feltarbeid på plantegning (Fabel arkitekter & Henning Larsen Architects, 2015).....	46
Figur 13 Bilde av vinduene som ble brukt under målingen. Termoelementene ble festet på det høyre vinduet, mens ledninger til utvendige termoelementer ble ført gjennom det venstre vinduet.....	47
Figur 14 Bilde av hvordan temperaturlogger er montert på den faste solavskjermingen og ledning til utvendig termoelement er dratt mellom vinduene.	48
Figur 15 Bilde av hvordan termoelementene er montert til konstruksjon med en tynn dobbeltsidig tape. Figuren viser termoelementet på utside bunnkarm.....	48
Figur 16 Vindusinnsetting med plassering av målepunkter for termoelementer på Campus Ås. Figuren mangler utvendig kledning. Målepunktet for utvendig beslag er ikke med på figuren siden det strekker seg over utvendig kledning.	49
Figur 17 Plantegning av 2. etasje i bygget Sørhellinga med anvisning merket med rød ring hvor feltarbeidet ble gjennomført (MazeMap, 2019).....	50
Figur 18 Innvendig og utvendig oppmontert feltarbeid på Sørhellinga. Målingene blir utført på vinduet til venstre sett innenfra, mens utvendig termoelement er dratt gjennom det høyre vinduet.....	51

Figur 19 Vindusinnsetting med plassering av målepunkter for termoelementer på Sørhellinga. Figuren mangler utvendig kledning. Målepunktene for innvendig og utvendig sidefasadeelement er ikke med på figuren siden dette er et vertikalt snitt av vindusinnsettingen.....	52
Figur 20 Innvendig termoelementer har nesten løsnet på henholdsvis bunn- og sidefasadeelement på Sørhellinga.	54
Figur 21 Eksempelskisse over deler som er med i beregning av kuldebro ved vindusinnsetting ved modellering. Lengde l_1 er lengde til modellert vindusinnsetting inkludert vegg, vindu og monteringsfuge. Lengde l_2 er lengde til modellert vegg og l_3 er lengde til modellert vindu (Figuren er ikke i skala.).	57
Figur 22 Avstanden b for ulike vindusinnsettinger er avstanden fra utside vindsperre til utvendig kant av vinduskarm [mm].	59
Figur 23 Modellert vindusinnsetting med henholdsvis midtsstilt (reell), inntrukket og uttrukket vindusinnsetting på Campus Ås. Det er lagt inn et felt med tre i veggkonstruksjonene for å få treandelen til 26 %. Fargene står for ulike materialer. I Vedlegg D er en beskrivelse av materialene.....	60
Figur 24 Modellert vindusinnsetting med henholdsvis midtsstilt, inntrukket og uttrukket (reell) vindusinnsetting på Sørhellinga. Fargene står for ulike materialer. I Vedlegg D er en beskrivelse av materialene.....	62
Figur 25 Grafer over målte temperaturer fra feltarbeidet for to døgn på Campus Ås. Måleutstyret bestående av temperaturloggere og termoelementer logget temperaturer hvert tiende minutt. Den grå grafen viser lufttemperaturen inne, mens den gule grafen viser lufttemperaturen ute. Den lyseblå kurven viser innvendig overflatetemperatur på beslaget som ligger utenpå bunnforingen i vinduskarmen. Overflatetemperaturene på utvendig beslag er fremstilt med den grønne grafen. Den mørkeblå grafen illustrere overflatetemperaturene på innvendig bunnkarm, mens den utvendig bunnkarm er vist ved den oransje grafen.	67
Figur 26 Termogram og fotografi av vinduene som ble brukt under måling tatt 15.02.19 på Campus Ås. En ser at det er kuldebro ved vindusinnsetting ved at overflatetemperaturen er betydelig kaldere rundt vinduene enn resten av vegg.	69
Figur 27 Termogram og fotografi av vinduene som ble brukt under måling tatt 21.02.19 på Campus Ås. Temperaturen på punktet ved bunnkarmen er målt til å være 13,4 °C.....	69
Figur 28 To presentasjoner av (reell) midtsstilt vindusinnsetting av dagens konstruksjon på Campus Ås. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.	70
Figur 29 To presentasjoner av (reell) midtsstilt vindusinnsetting av dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Campus Ås. Den venstre delen av figuren viser materialer, isotermer med svarte streker og overflatetemperaturer hvor termoelementene under feltarbeidet var montert. Den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.....	71
Figur 30 Grafer over målte temperaturer fra feltarbeidet for ca. en uke på Sørhellinga. Måleutstyret bestående av temperaturloggere og termoelementer logget temperaturer hvert tiende minutt. Den mørkeblå grafen viser lufttemperaturen inne, mens den oransje grafen viser lufttemperaturen ute. Den gule kurven viser innvendig overflatetemperatur på sidefasadeelementet. Overflatetemperaturene på utvendig sidefasadeelement er fremstilt med den grønne grafen. Den lyseblå grafen illustrere overflatetemperaturene på innvendig bunnfasadeelement, mens temperaturen på utvendig beslag er vist ved den lilla grafen.....	73

Figur 31 Termogram og fotografi av vinduene som ble brukt under måling tatt 12.03.19 på Sørhellinga. En ser at det er kuldebro ved vindusinnsetting ved at overflatetemperaturen er betydelig kaldere rundt vinduene enn resten av veggen.	75
Figur 32 Termogram og fotografi av vinduene som ble brukt under måling tatt 12.03.19 på Sørhellinga. Temperaturen på punktet ved bunnkarmen er målt til å være 15,6 °C.	75
Figur 33 To presentasjoner av (reell) uttrukket vindusinnsetting av dagens konstruksjon på Sørhellinga. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.	76
Figur 34 To presentasjoner av (reell) uttrukket vindusinnsetting av dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Sørhellinga. Den venstre delen av figuren viser materialer, isotermer med svarte streker og overflatetemperaturer hvor termoelementene under feltarbeidet var montert. Den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.	77
Figur 35 Grafisk fremstilling av vindusposisjon i veggliv vs. kuldebroverdi for dagens konstruksjon på Campus Ås og Sørhellinga.	95
Figur 36 Termogram og fotografi av utvendig fasade på Campus Ås. De anvendte vinduene under måling er vindu to og tre til høyre for hjørne. Det kommer tydelig frem fra termogrammet at vindusinnsettingen utgjør et ekstra varmetap for bygningen.	108
Figur 37 Termogram og fotografi av innvendig kontorhjørne tatt 15.02.19 på Campus Ås. Temperaturen innerst i hjørnet er lavere enn resten av veggene. Det kan komme av at luften står mer stille i hjørnet og at det er en geometrisk kuldebro i hjørner på grunn av utvendig og innvendig areal har forskjellig størrelse.	108
Figur 38 Termogram og fotografi av nedre del av vinduene brukt under feltarbeidet tatt 15.02.19 på Campus Ås. Termogrammet viser at karmprofilen til det høyre vinduet sett innenfra er noe varmere enn den venstre karmprofilen.	109
Figur 39 Termogram og fotografi av nedre del av vinduet brukt under feltarbeidet tatt 12.03.19 på Sørhellinga. Punktet i bilde viser at temperaturen på bunnfasadeelementet er på 14,0 °C.	109
Figur 40 Termogram og fotografi av vindu brukt under feltarbeid tatt 12.03.19 på Sørhellinga. Termogrammet viser at punktet på sidekarmen har en temperatur på 16,2 °C.	110
Figur 41 To presentasjoner av (reell) midtstilt vindusinnsetting med innside etterisolering av vegg på Campus Ås. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.	111
Figur 42 To presentasjoner av (reell) midtstilt vindusinnsetting med innside etterisolering av karm på Campus Ås. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.	111
Figur 43 To presentasjoner av (reell) uttrukket vindusinnsetting med innside etterisolering av vegg på Sørhellinga. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.	112
Figur 44 To presentasjoner av (reell) uttrukket vindusinnsetting med innside etterisolering av fasadeelement på Sørhellinga. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.	112

TABELLISTE

Tabell 1 Metoder for beregning av kuldebroer med forventet usikkerhet (NS-EN ISO 14683:2017, 2017).	18
Tabell 2 Fordeler og ulemper med aluminium som konstruksjonsmateriale i vinduer (Byggdetaljer 533.151, 2016).....	32
Tabell 3 Faktorer som påvirker varmetapet gjennom et vindu (SINTEF Byggforsk, 2009). ..	34
Tabell 4 Fordeler og ulemper for vindusinnsetting i flukt med vindsperren (Byggdetaljer 523.701, 2018).....	35
Tabell 5 Fordeler og ulemper for vindusinnsetting inntrukket i veggen (Byggdetaljer 523.701, 2018).....	36
Tabell 6 Opp- og nedmontering av måleutstyr på Campus Ås.	47
Tabell 7 Opp- og nedmontering av måleutstyr på Sørhellinga.	50
Tabell 8 Varmeovergangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946:2017.....	64
Tabell 9 Temperaturgrensebetingelser i henhold til NS-EN ISO 10077-2:2017	64
Tabell 10 Gjennomsnittstemperaturer basert på data fra to døgn for ulike plasseringer av temperatursensorer på Campus Ås.	68
Tabell 11 Estimert varmetap og kuldebroverdier gjennom monteringsfuge på Campus Ås. Beregnet ut fra målt overflatetemperatur på innvendig bunnkarm og innvendig beslag.	68
Tabell 12 Beregnede kuldebroverdier fra ulike vindusinnsetninger og tiltak på Campus Ås. .	71
Tabell 13 Differansen mellom beregnede kuldebroverdier i Tabell 12 og (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Campus Ås.	72
Tabell 14 Prosentvis endring i kuldebroverdier i Tabell 12, sammenliknet med (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Campus Ås.	72
Tabell 15 Gjennomsnittstemperaturer basert på data fra tre døgn (etter at vinduet ble åpnet) for ulike plasseringer av temperatursensorer på Sørhellinga.	74
Tabell 16 Estimert varmetap og kuldebroverdier gjennom monteringsfuge på Sørhellinga. Beregnet ut fra målt overflatetemperatur på innvendig bunnfasadeelement og innvendig sidefasadeelement.....	74
Tabell 17 Beregnede kuldebroverdier fra ulike vindusinnsetninger og tiltak på Sørhellinga...	77
Tabell 18 Differansen mellom beregnede kuldebroverdier i Tabell 17 og (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Sørhellinga.	78
Tabell 19 Prosentvis endring i kuldebroverdier i Tabell 17, sammenliknet med (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Sørhellinga.	78

1 INNLEDNING

Dette kapittelet gir en oversikt over strukturen og innholdet i oppgaven. Her blir oppgavens bakgrunn, beskrivelse, problemstilling og formål introdusert.

1.1 Bakgrunn

I fremgangen av de nye byggereglene for bygninger i Norge med økte isolasjonstykkelse og tettere hus, så blir bygningsfysikk viktigere og viktigere for levetiden og effekten av valgene man tar. En stor del av dette er problemer eller bygningsfysikk i overganger og grensesnitt mellom vegg og vindu, dører og fasader. Er dette riktig gjort, kan det være positive bidrag for energibruken og levetid, men gjort feil vil det også kunne ha en stikk motsatt effekt.

Etterspørsel etter mer glass i bygninger er økende. Det er blitt mer vanlig med større glassflater og arealer i bygninger. Det har ført til at lengde "vinduskarm" i tilslutninger mellom vindu og vegg også øker. Den viktigste funksjonen til vinduer er å slippe igjennom dagslys, men på grunn av det økende fokuset på energi og miljø, står vinduers energisparende egenskaper nesten like sentralt. Vinduer har lavere varmeisolerende egenskaper enn vegger. Det gjør at egenskaper som varmeisolasjonsevne, innslipp og skjerming av solstråling, samt kuldebroer ved vindusinnsetting har stor påvirkning på varmetapet fra en bygning.

Kravene fra myndighetene i Byggteknisk forskrift har de siste årene blitt strengere med tanke på energieffektivitet. Forbruk av energi til oppvarming av bygg skal være lavere enn før, og samlet krav til isolasjonsevne i bygninger har økt. Det har ført til at det bygges flere energieffektive hus med konstruksjoner med mer isolasjon, tettere bygg og med effektive varmegjenvinnere. I tillegg til at krav blir strengere i forskrifter, blir det bygget flere bygg med miljøsertifiseringer grunnet økt etterspørsel fra byggherrer.

Salget av vinduer i Norge har endret seg de siste ti årene. I 2009 hadde trevinduer i Norge en markedsandel på 90 %, mens trevinduer i Mellom-Europa hadde en markedsandel på 30 % (SINTEF Byggforsk, 2009). I Norge i dag er markedsandelen mellom tre-, aluminium-, PCV-, og stålvinduer endret seg. Det har blitt langt mer populært å bruke vinduer av spesielt aluminium og PVC til fordel for trevinduer, spesielt i næringsbygg. Denne oppgaven tar for seg vinduer med aluminiumsprofiler fra Schüco og er foreslått av Schüco Norge. Schüco er en av verdens ledende produsenter av aluminium-, PVC- og stålfiler til vinduer, dører og fasader. Det er et tysk firma som eksporterer produkter til store deler av verden.

Oppgaven tar for seg kuldebroer ved vindusinnsetting og ser på hvordan en kan minimere kuldebroene ved å prosjektere dem godt. Kuldebroer ved vindusinnsetting er kuldebroer som finner sted i overgang mellom vindu og vegg. Denne oppgaven ser på vinduets posisjon i vegglivet og tiltak for å redusere kuldebro ved vindusinnsetting. Det er lite forskning i Norge på vinduer med ramme- og karmprofil i aluminium. Av den grunn er det interessant å undersøke aluminiumsvinduer under norske forhold og se om resultatet er sammenliknbart med tidligere forskning på temaet hvor trevinduer er studert.

1.2 Oppgavebeskrivelse

Problemstillingene i oppgaven er som følger:

- Kan numerisk beregning av kuldebro verifiseres med temperaturmålinger?
- Hvordan påvirker plassering av vindu i vegglivet kuldebroeffekten i bygg med vinduer med ramme- og karmprofil i aluminium?
- Hvordan vil etterisolering som tiltak påvirke kuldebro ved vindusinnsetting?
- Kan det designes en standard plassering av vindu i vegglivet for et optimalt energieffektivt bygg?

For å få svar på problemstillingen skal varmegjennomgangen i grensesnittene mellom vegg og vinduer i aluminium i forskjellige veggkonstruksjoner og vindusposisjoner undersøkes. Det skal gjøres ved å gjennomføre feltarbeid med temperaturmålinger på to bygninger, ett nytt og ett eldre og ved hjelp av modellering i dataprogram. I tillegg skal det undersøkes ved hjelp av modellering hvordan tilleggisolering innvendig på eksisterende vegger og ramme- og karmprofiler påvirker varmegjennomgang i vindusinnsettinger.

Oppgaven skal verifisere beregningsmetode for kuldebroer ved å sammenligne beregninger i numerisk modell og data fra målinger gjort på områder rundt kuldebro. Oppgaven skal også ved beregninger vurdere plassering av vindu i vegglivet fra et energimessig synspunkt kan optimaliseres ved forskyving av vindusinnsetting eller etterisolering av vegg eller ramme- og karmprofil.

Vinduer det er snakk om i oppgaven er fasadevinduer som står vertikalt i ytterveggen med ramme- og karmprofil av aluminium.

I oppgaven er det sett bort fra kondens på og i konstruksjonen og varmetap på grunn av luftlekkasjer. Det skyldes at kuldebroer rundt vinduer har lite innvirkning på overflatetemperaturen, og da er det liten fare for overflatekondens (Byggdetaljer 471.015, 2008).

Oppgaven er satt sammen av en teoridel som belyser anvendt teori, en metodedel som beskriver hva som er gjort. Videre følger resultater fra feltarbeid og modellering, før resultatene analyseres i en diskusjon. Tilslutt følger en konklusjon på problemstillingen.

2 TEORI

I dette kapittelet blir anvendt teori forklart og relevante byggetekniske krav.

2.1 Definisjoner

Emisjonstall

Emisjonstallet ε sier noe om absorpsjons- og utstrålingsevnen til et materiale (Byggdetaljer 571.954, 2016). Det er et tall som angir hvor mye energi et materiale avstråler i forhold til en perfekt strålingsfalte. Tallet angis fra 0-1, hvor et materiale med emisjonstall 0 er en perfekt reflekterende flate og et emisjonstall på 1 er en perfekt strålingsflate. En perfekt reflekterende flate stråler ut all lys- og varmestråling, mens en perfekt strålingsflate absorberer all denne strålingen. En blank overflate vil ha tilnærmede lik 0 som emisjonstall, mens en matt overflate vil ha et emisjonstall nært 1.

Isolerruter

Ruter som er laget med to eller flere glass fra fabrikk kalles isolerruter (Byggdetaljer 571.953, 2016). For slike ruter er det innerste glasset på innsiden vanligvis belagt med et metallbelegg som emitterer lite. Belegget reduserer varmetransporten fra langbølget stråling gjennom ruten. Mellom glassene brukes ofte gassen argon som isolerer bedre enn luft. Ruten er satt sammen med en tett forsegling langs kanten av glassene. Når en isolerrute er produsert på fabrikk er det ikke mulig å endre den. Hvis det skal skje, må materialene først gjenvinnes før en ny rute kan produseres av materialet.

Isoterm

Isoterm er en fremstilling av punkt, linje eller område med forholdsvis lik temperatur (NS-EN 13187:1998, 1998). Ulike temperaturer kan fremstilles ved forskjellige farger eller linjer.

Kondens

Kondens er vann som utfelles når luft blir nedkjølt (Edvardsen & Ramstad, 2014). Det kan oppstå ved flere tilfeller i og på konstruksjonen. Det ene er ved vanndamptransport gjennom konstruksjonen. Det kan oppstå når det er forskjellig vanndampkonsentrasjon(damptrykk) på hver side av konstruksjonen. Det kan også oppstå kondens inne i konstruksjonen ved luftlekkasjer. Hvis luften fra luftlekkasjene avkjøles gjennom konstruksjonen kan luften utfelle kondens. I tillegg kan kondens oppstå på overflater som er kalde, som for eksempel vinduer. Luftens temperatur har mye å si for fuktinnholdet i luften. Alle temperaturer kan holde på en viss mengde vann og har en grense på når luften er «mettet» på fuktighet. Når luften inneholder maksimalt vanndampinnhold sier man at temperaturen har nådd duggpunktet. Senkes temperaturen til mettet luft, vil luften utfelle kondens/vann.

Konveksjon

Konveksjon er en type varmetransport. Det er luft eller andre gasser som strømmer mellom to overflater med ulik temperatur (SINTEF Byggforsk, 2009). Luften mot varm side varmes opp, den blir lettere og stiger. Videre kommer den varme luften nærmere den kalde overflaten og avkjøles. Dermed blir luften tyngre og synker. Denne syklusen kalles konveksjon.

Kuldebro

En kuldebro er en del av en bygningskonstruksjon som utgjør et ekstra varmetap (NS-EN ISO 10211:2017, 2017). Kuldebroer finner sted når materialer med forskjellig varmekonduktivitet gjennomtrenger ytterkonstruksjon, når en konstruksjon endrer tykkelse eller hvis det oppstår forskjell på innvendig og utvendige areal på konstruksjonen. Det oppstår en lokal og sterk varmestrøm i slike områder som fører til et ekstra varmetap for bygningen. Dette vil føre til en økt overflatetemperatur på den kalde siden av konstruksjonen og en redusert overflatetemperatur på den varme siden av konstruksjonen.

Kuldebroyter

En kuldebroyter er et isolerende sjikt som reduserer virkningen av en kuldebro (Byggdetaljer 471.015, 2008). Det er plassert inne i konstruksjonen og ligger ofte i forkant av kuldebroen mot kalde side.

Kuldebroverdi

En kuldebroverdi brukes til å angi varmetapet i for kuldebroer (NS-EN ISO 10211:2017, 2017). Lineære kuldebroer Ψ oppgis per lengdeenhet [W/(mK)], mens kuldeborer som er flerdimensjonale eller punktwise X oppgis i watt per kelvin [W/K].

Todimensjonal beregning av lineære kuldebroverdi for konstruksjoner over bakken beregnes etter formelen:

$$\Psi_k = L^{2D} - \sum_i U_i - l_i \text{ [W/(mK)]} \quad (4)$$

Hvor:

L^{2D} : todimensjonal lineær varmekoplingskoeffisient, som er produktet av U-verdi og lengden til hele konstruksjonsdetalj med kuldebro [W/(mK)]

U_i : U-verdi for bygningsdel i [W/(m²K)]

l_i : lengde av bygningsdel i [m]

Luftlekkasjer

Ulikt lufttrykk ute og inne gjør at luft strømmer ut eller inn gjennom utettheter i et bygg (Edvardsen & Ramstad, 2014). Vind, temperaturforskjeller og ventilasjonssystemer gjør at det blir forskjellig lufttrykk inne og ute. Et høyere lufttrykk inne enn ute gjør at luften presses ut av bygget, mens et undertrykk inne gjør at luft fra utsiden strømmer inn i bygget.

Luftlekkasjer i bygningskroppen skjer som regel i sammenskjøter mellom bygningsdeler.

Typiske tilfeller hvor luftlekkasjer finner sted er overgang vegg til tak, mellom etasjeskillere, rørføringer og i tilslutninger rundt dører og vinduer. Et bygg med mye luftlekkasjer vil ha et større energiforbruk sammenliknet med et bygg med bra lufttetning. Det skyldes at luften som strømmer inn eller ut gjennom luftlekkasjer i bygningskroppen varmes opp innendørs, og ikke blir varmegjenvunnet gjennom noe ventilasjonsanlegg.

Normalisert kuldebroverdi

Det totale varmetapet fra kuldebroer i en bygning oppgis i normalisert kuldebroverdi Ψ'' (Edwardsen & Ramstad, 2014). Den beregnes ved å summere alle kuldebroer og dividere på oppvarmet bruksareal (BRA). Formelen er som følger:

$$\Psi'' = \frac{\sum_k \Psi_k \cdot l_k + \sum_j X_j}{A_{fl}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (5)$$

Hvor:

Ψ_k : lineær kuldebroverdi i [W/(mK)]

l_k : lengde på kuldebro i [m]

X_j : kuldebroverdi for punktkuldebro j [W/K]

A_{fl} : oppvarmet bruksareal (BRA) for bygningen [m²]

Termografering

Ved termografering brukes et varmekamera. Kameraet måler infrarød stråling fra overflater (Edwardsen & Ramstad, 2014). Den infrarøde strålingen er først og fremst bestemt av temperaturen, noe som gjør det mulig å se temperaturforskjeller i bygningsdeler.

Termografering gir oss et visuelt bilde av varmen på flatene i en konstruksjon. Overflater med en temperatur høyere enn 0 °C sender ut varmestråling. De fleste normale temperaturer på bygningsdeler ligger innenfor det infrarøde spekteret. Det infrarøde spekteret inneholder stråling med en lav frekvens, og det er grunnen til at vi ikke kan se varmestråling.

Varmekameraet fanger opp varmestråling og gjør strålingsintensiteten om til et termogram som er et bilde over strålingsintensiteten.

U-verdi

U-verdi eller varmegjennomgangskoeffisient sier noe om hvor bra varmemotstand en konstruksjon har og hvor enkelt varme slipper gjennom konstruksjonen (SINTEF Byggforsk, 2009). Konstanten brukes for å angi varmetap for konstruksjoner med arealmessig utstrekning. Varmetap fra større sammenhengende areal tas med i U-verdien, men varmetap som ikke U-verdiene klarer å fange opp som for eksempel punkter, tilslutninger og innfestinger tas med i kulebroberegningene (Bjørnulf & Bryn, 2017). U-verdien er den inverse av den totale varmemotstanden R_{tot} til konstruksjonen. Det er ønskelig med et lite varmetap. Det vil derfor være bra å ha en høy varmemotstand i materialet som vil gi en tilhørende lav U-verdi. En bygningsdel som er oppgitt med en lav U-verdi isolerer godt.

U-verdien er gitt som følger:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (2)$$

Hvor:

R_{tot} : total varmemotstand

Varme

Bevegelsesenergien til molekyler og atomer i et stoff kan betegnes som varme (Edwardsen & Ramstad, 2014). Bevegelsene til partiklene i stoffet eller materialet varierer med temperaturen til materialet. Desto høyere temperatur desto mer bevegelsesenergi.

Varmedledning

Varmedledning skjer ved at molekylene i materialet overfører bevegelsesenergi mellom hverandre (Edwardsen & Ramstad, 2014). Molekyler med høy bevegelse overfører bevegelsesenergi til molekyler med lav bevegelse ved sammenstøt. Denne overføringen av bevegelse transporterer varme. Varmedledningsevnen til et materiale har mye å si for varmetransporten. Materialer med høy densitet har høy varmedledningsevne, for eksempel stein og metaller. Isolasjonsmaterialer har på den andre siden lav tetthet, og dermed også lav varmedledningsevne. Et slikt materiale egner seg derfor godt for å unngå varmetap.

Varmemotstand

Varmemotstand R er en konstant som brukes for å si noe om hvor stor varmegjennomgangen eller hvor stort varmetap det er gjennom en konstruksjon (Edvardsen & Ramstad, 2014).

Utrekningen av varmemotstanden for et homogent materialsjikt er:

$$R = \frac{d}{\lambda} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (1)$$

Hvor:

d = materialets tykkelse [m]

λ = materialets dimensjonerende varmekonduktivitet [W/(mK)]

Den totale varmemotstanden R_{tot} for en konstruksjon beregnes ved å summere summen av alle varmemotstander R for hvert materialsjikt.

Varmeovergangsmotstand

Varmeovergangsmotstand er en ekstra varmemotstand R som må tas hensyn til når en regner ut U -verdi for en konstruksjon (Edvardsen & Ramstad, 2014). Luftsjiktet inntil materialets overflate på både innsiden og utsiden har en varmemotstand. Det er først og fremst varmeoverføring gjennom konveksjon og stråling som utgjør varmeovergangsmotstanden. Av disse varmetransportene er det lufthastigheten ved overflaten, temperaturen og strålingsegenskapene til materialet som har betydning. Varmeovergangsmotstanden på utvendige overflater er forholdsvis liten sammenliknet med den innvendige varmeovergangsmotstand. Det kommer av at konstruksjonene får påvirkning av vind og overflaten stråler ut mot omgivelsene, noe som gir en lavere varmeovergangsmotstand. Det er vanlig å bruke standardiserte varmeovergangsverdier ved beregning av U -verdier som står for den gjennomsnittlige konveksjonen og strålingen innvendige og utvendige overflater blir utsatt for.

Varmestråling

Varmestråling er en form elektromagnetisk stråling, på lik linje som lys og radiobølger (Edwardsen & Ramstad, 2014). Varmeoverføringene skjer ved at materialoverflater emitterer (sender ut) varmemstråling, og samtidig absorberer (mottar) stråling fra andre flater.

Varmestråling kan skje gjennom fast materialer, noen væsker og gjennom de fleste gasser.

Når stråling treffer et materiale kan den absorberes, transmitteres eller reflekteres. Hvor mye som absorberes, transmitteres eller reflekteres avhenger av materialtypen, men summen av de tre faktorene er alltid lik 1.

Varmetap

Varmetapet fra bygningsdeler, også kalt varmetransmisjonstap, består av varmetapet fra konstruksjonen utenom kuldebroen og tilleggsvarmetapet fra kuldebroen. Varmetapet til det fri beregnes etter SN/TS 3031:2016 etter formelen:

$$H_D = \sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k \Psi_k \cdot l_k + \sum_j X_j \quad [W/K] \quad (3)$$

Hvor:

U_i : U-verdi/varmegjennomgangskoeffisient for bygningsdel i [$W/(m^2K)$]

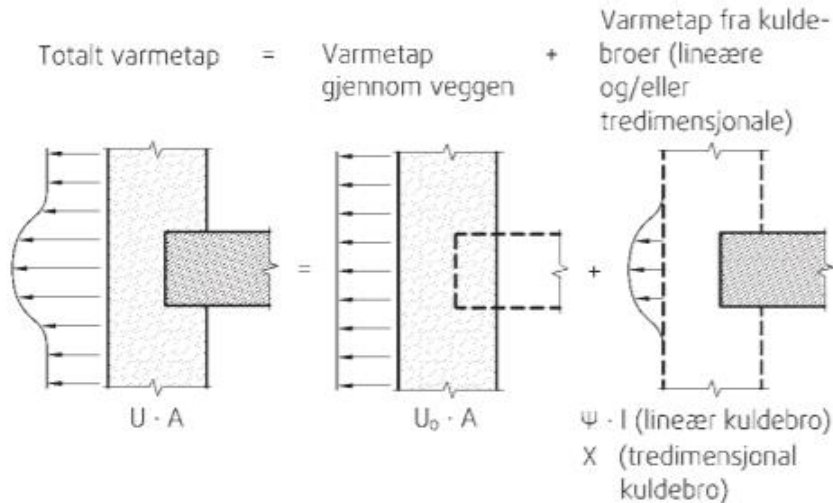
A_i : innvending areal av bygningsdel i [m^2]

Ψ_k : kuldebroverdi for lineær kuldebro k, beregnet på innvendige mål [$W/(mK)$]

l_k : lengden av lineær kuldebro k [m]

X_j : varmegjennomgangskoeffisient for punktformig kuldebro j [W/K]

Figuren under er et eksempel på en kuldebro og hvordan det totale varmetapet fra en konstruksjonsdel beregnes.



Figur 1 Eksempel på hvordan totalt varmetap fra en konstruksjonsdel beregnes. Det totale varmetapet er summen av varmetapet gjennom veggen og varmetap fra kuldebroer (Byggdetaljer 471.015, 2008).

Varmetransport

Varmetransport oppstår når det er forskjellig temperatur i et materiale eller på hver side av en konstruksjon (Edvardsen & Ramstad, 2014). Da transporteres varmen fra den varmeste siden til siden med lavere temperatur. En slik varmetransport kan skje på tre forskjellige måter i en bygningskonstruksjon. Disse tre transportformene er varmeledning, konveksjon og stråling. Den totale varmetransporten gjennom et materiale kalles varmekonduktivitet.

Vindusinnsetting

En vindusinnsetting beskriver tilslutning mellom vindu og vegg.

2.2 Krav

Det er krav fra Direktoratet for byggkvalitet på hvor stort varmetap bygninger i Norge kan ha, og det er pålagt å følge Byggteknisk forskrift, også kalt TEK17. Det er hensiktsmessig å stille krav og dokumentasjon til kuldebroer. Hovedgrunnen til dette er for å oppnå energieffektive bygninger med høy byggeteknisk kvalitet. I henhold til TEK17 skal kuldebroer i bygninger vurderes opp mot kravet til normalisert kuldebroverdi.

2.2.1 Normalisert kuldebroverdi

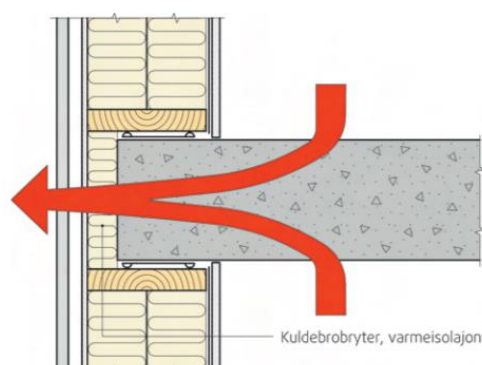
Det er krav om at den normaliserte kuldebroverdien ikke overstiger 0,05 [W/(m²K)] for småhus og 0,07 [W/(m²K)] for boligblokk/øvrige bygninger (Byggteknisk forskrift, 2017a).

Det er likevel mulig å ha en høyere normalisert kuldebroverdi hvis det omfordeles mellom de ulike varmetapspostene i en bygning (Byggteknisk forskrift, 2017b). Det viktigst er at bygningens totale varmetapstall ikke øker og minimumskravene på U-verdi for ulike bygningsdeler og lekkasjetall oppfylles.

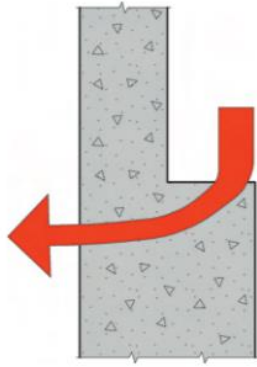
2.3 Kuldebroer

Det er flere årsaker til at kuldebroer oppstår, men det er gjerne tre forhold som er avgjørende. Det ene er at ytterveggen blir gjennomtrengt av materialer med høyere varmekonduktivitet (Byggdetaljer 471.015, 2008). Det andre er at materialtykkelsen endres, og det siste er at arealet på innvendig og utvendig overflater har forskjellige størrelser. Materialebetinget kuldebroer fremkommer på grunn av at ulike materialer har forskjellig varmeledningsevne. Kuldebroer som kommer av materialbruken er ofte forårsaket av bæresystemet til bygget. Bjelker, søyler og dekker tar som regel plass i isolasjonslaget i ytterkonstruksjonen og reduserer varmeisolasjonen i områder. Bæresystemer er ofte i materialer som betong, stål eller tre som har en høyere varmekonduktivitet enn isolasjon. Når materialtykkelsen endres, vil konstruksjonen få et ekstra varmetap i overgangen fra tykk til tynnere konstruksjon. Et eksempel er når en vegg endrer tykkelse i overgang fra kjeller. Kuldebroer som oppstår på grunn av forskjell i størrelse på innvendige og utvendige areal kalles gjerne for geometriske kuldebroer. De oppstår ofte ved vinkler i konstruksjonen. Et eksempel er hjørnedetaljer. Selv om to vegger som møtes i hjørne har samme tykkelse og består av de samme materialene, blir det et større utvendig enn innvendig areal. Det vil føre til et ekstra varmetap i hjørnet. Mange kuldebroer oppstår likevel ofte som en kombinasjon av både materialbruken, forskjellen i tykkelse i konstruksjonene og geometrien på innvendig og utvendige overflater.

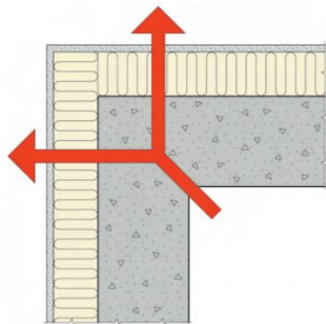
Under er noen eksempler på ulike kuldebroer som er hentet fra Byggdetaljer 471.015.



Figur 2 Kuldebro som oppstår på grunn av materiale med høyere varmekonduktivitet trenger inn i yttervegg. Isolasjonssjiktet i forkant av kuldebroen er et eksempel på en kuldebroyter (Byggdetaljer 471.015, 2008).



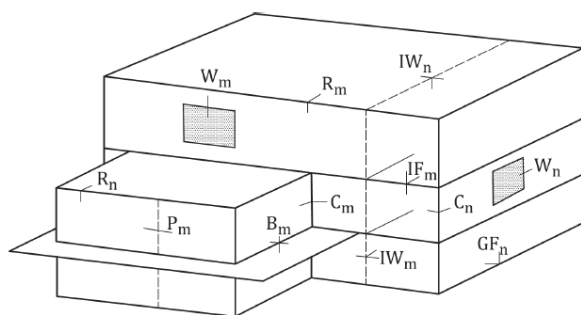
Figur 3 Kuldebro som oppstår på grunn av endring i tykkelse av materiale (Byggdetaljer 471.015, 2008).



Figur 4 Geometrisk kuldebro som oppstår på grunn av forskjell på innvendig og utvendig areal av konstruksjonen (Byggdetaljer 471.015, 2008).

Størrelsen på kuldebro vil variere fra den ene konstruksjonstype til den andre. I bygninger med lette konstruksjoner av for eksempel tre og med lite isolasjon i veggene, vil kuldebroer være mindre enn ved tunge konstruksjoner i for eksempel stål og betong og mye isolasjon i veggene (Byggdetaljer 471.015, 2008). Årsaken til dette er at materialer som stål og betong har høyere varmekonduktivitet enn tre. Det blir også større kuldebroeffekt når forskjellen på tykkelsen på konstruksjoner varierer. En godt isolert vegg vil for eksempel føre til en større kuldebro i overgang mellom vegg og vindu, enn en tynnere vegg siden forskjellen i tykkelse blir større. I tillegg vil geometriske kuldebroer forsterkes med økt konstruksjonstykkelse.

Det er en rekke kuldebroer i en bygning. De mest vanlige kuldebroene i en bygning er rundt vinduer og dører, hjørner, gesims, etasjeskiller mot ytterfasade, innervegger mot ytterfasade, sokkel, bæresøyler og -bjelker i vegg, samt balkong- og solskjermingsinnfesting. Under er en figur hentet fra NS-EN ISO 1483:2017 over typiske todimensjonale kuldebroer i en bygning med plasseringer.



Figur 5 Illustrasjon av ulike kuldebroer med plassering i bygningskroppen. Hver av bokstavene står for forskjellige kuldebroer som normalt finnes i en bygning. Vindusfuger (W), hjørner (C), gesims (R), etasjeskiller mot ytterfasade (IF), innervegg mot ytterfasade (IW), sokkel (GF), bæresøyler-/bjelker i vegg (P) og balkong-/solavskjermingsinnfesting (B) (NS-EN ISO 14683:2017, 2017).

2.3.1 Konsekvenser av kuldebroer

Kuldebroer kan føre til en rekke negative konsekvenser. Disse konsekvensene er økt varmetap, lave overflatetemperaturer, redusert komfort, overflatekondens, sverting og temperaturspenninger (Byggdetaljer 471.015, 2008). Først og fremst vil en kuldebro gi et økt varmetap fra bygningen og føre til lave overflatetemperaturer. Redusert komfort, overflatekondens, sverting og temperaturspenninger er igjen et resultat av lave overflatetemperaturer. Det vil si at de ulike konsekvensene kan påvirke og forsterke hverandre. Det gjør at kuldebroer ofte kan gi verre konsekvenser enn forventet.

Økt varmetap ved kuldebroer er et resultat av endring i isoleringsevnen til konstruksjonen. Energiregnskapet til bygningen vil bli påvirket av et økt varmetap, og det vil føre til økte utgifter i forbindelse med oppvarming av bygningen. I tillegg er det ugunstig med tanke på miljø og klima at bygningen slipper ut ekstra varme. Det er derfor viktig at det ekstra varmetapet som skjer gjennom kuldebroer reduseres så mye som mulig.

Lave overflatetemperaturer vil oppstå på innvendige flater ved kuldebroer. De lave overflatetemperaturene kommer av at det er et økt varmetap gjennom konstruksjonen i dette området. På utsiden av kuldebroen vil det bli økt overflatetemperatur. Det er større risiko for lave overflatetemperaturer i for eksempel hjørner i bygninger ettersom lufthastigheten er lavere her, og lufta kan bli stående mer stille i et hjørne. I tillegg er kald utvendig flate større enn innvendig flate i et hjørne, som gjør at det oppstår et ekstra varmetap.

Redusert komfort i bygningen kan oppstå ved lave overflatetemperaturer. Termisk komfort eller varmekomfort er betegnelsen på en subjektiv følelse av å være fornøyd med de termiske

omgivelsene. Den termiske komforten vil derfor variere fra person til person. Bekledning, aktivitetsnivå, sinnstilstand og termisk inneklima er faktorer som påvirker varmekomforten. Det termiske inneklimaet er satt sammen av lufttemperatur, temperatur på omgivende flater, lufthastighet og luftfuktighet. Lave overflatetemperaturer kan derfor føre til at brukeren av bygningen ønsker å øke lufttemperaturen for å bedre den termiske komforten. Det vil igjen føre til et økt varmetap i bygningen.

Overflatekondens kan oppstå på overflater ved kuldebroen. Det kan skje hvis det er høy luftfuktighet i kombinasjon med lave overflatetemperaturer. Overflatekondens kan i verste tilfelle føre til muggvekst som gjør at overflatematerialet brytes ned, overflaten blir mindre estetisk, samt at det kan føre til helserisiko ved å oppholde seg i bygningen.

Sverting kan skje samme steder som overflatekondens og er et resultat av at støvpartikler lettere fester seg til kalde enn varme overflater. Forskjellen mellom inne- og utetemperaturen er som regel mindre når sverting oppstår enn ved overflatekondens. Sverting oppstår gjerne på innvendige overflater i hjørner og gjør at overflaten fremstår som sjenerende.

Det vil oppstå temperaturspenninger i konstruksjonen siden området rundt kuldebroen består av ulike temperaturgradienter. Den store forskjellen i temperaturer kan føre til oppstreking av konstruksjonen.

Utbedring av kuldebroer i etterkant er svært kostbart, så det anbefales å ta hensyn til dem tidlig i prosjekteringsfasen for å unngå konsekvensene som er nevnt over (SINTEF Byggforsk, 2008).

2.4 Beregning av kuldebroer

Det er flere metoder å dokumentere kuldebroer på. Det kan gjøres ved grovestimering, tabelloppslag i erfaringsbaser, manuell beregning eller numerisk beregning (Byggdetaljer 471.016, 1999). De ulike metodene for å dokumentere kuldebroer gir ulike nøyaktighet.

Tabell 1 gir en oversikt over feilmarginene hver av metodene vil kunne gi:

Tabell 1 Metoder for beregning av kuldebroer med forventet usikkerhet (NS-EN ISO 14683:2017, 2017).

Metoder	Kommentar	Forventet usikkerhet for Ψ
Grovestimering	Standardverdier for ulike kuldebroer kan hentes fra NS-EN ISO 14683:2017, Vedlegg C	0 - 50 %
Tabelloppslag	Tabeller over kuldebroverdier kan finnes i byggdetaljer fra Byggforskserien	± 20 %
Manuell beregning	Beregning kan utføres som beskrevet i Byggdetaljer 471.016	± 20 %
Numerisk beregning	Bruk av dataprogrammer med beregninger i henhold til NS-EN ISO 10211:2017	± 5 %

2.4.1 Grovestimering

Grovestimering tar utgangspunkt i standardverdier for ulike todimensjonale kuldebroer.

Standardverdier for ulike kuldebroer kan hentes fra NS-EN ISO 14683:2017, Vedlegg C. Det gjøres tidlig i prosjekteringsfasen og er en metode som utføres med stor sikkerhetsmargin. Det vil si at det tas utgangspunkt i større kuldebroverdier enn de reelle for å være på den sikre siden. Den ferdige bygningen vil da være mer energisparende enn det som er dokumentert. Det er mulig å gå videre med mer nøyaktige metoder for å beregne kuldebroverdier hvis ressurser er til stede.

2.4.2 Tabelloppslag

Tabelloppslag er en annen metode for å finne kuldebroverdier. Det er en mer nøyaktig metode enn grovestimering. Metoden forutsetter at det finnes et tabelloppslag som er tilnærmet lik den aktuelle kuldebroen. Som regel vil en sjelden finne et tabelloppslag som er lik den detaljen du selv står ovenfor. I slike tilfeller er det også mulig å benytte tabelloppslaget så lenge varmemotstanden i ulike materialer har lik eller bedre varmemotstand. Hvis materialtykkelsen på sjikt i kuldebroen varierer fra tabelloppslaget, er det mulig å interpolere eller ekstrapolere for andre materialtykkelser uten at det blir store forskjeller. Kuldebroverdiene i tabelloppslagene skal være beregnet numerisk etter NS-EN ISO 10211:2017. Det vil si at verdien i tabellen er svært nøyaktig og vil kunne dokumentere kuldebroen på en god måte. Tabelloppslag over kuldebroverdier for forskjellige kuldebroer kan finnes i diverse byggdetaljer fra Byggforskserien.

2.4.3 Manuell beregning

Manuell beregning er en annen måte å finne frem til kuldebroverdier. Denne beregningsmetoden kan gjøres på enkle konstruksjoner uten at beregningsprosessen blir for omfattende. Beregningen kan gjennomføres ved å dele konstruksjonen inn i plane homogene sjikt for hvert materiale og utføres ved å finne øvre og nedre grenseverdi for varmemotstand gjennom konstruksjonen. Metoden er nærmere beskrevet i Byggdetaljer 471.016 *Kuldebroer – Metoder for å bestemme kuldebroverdi*.

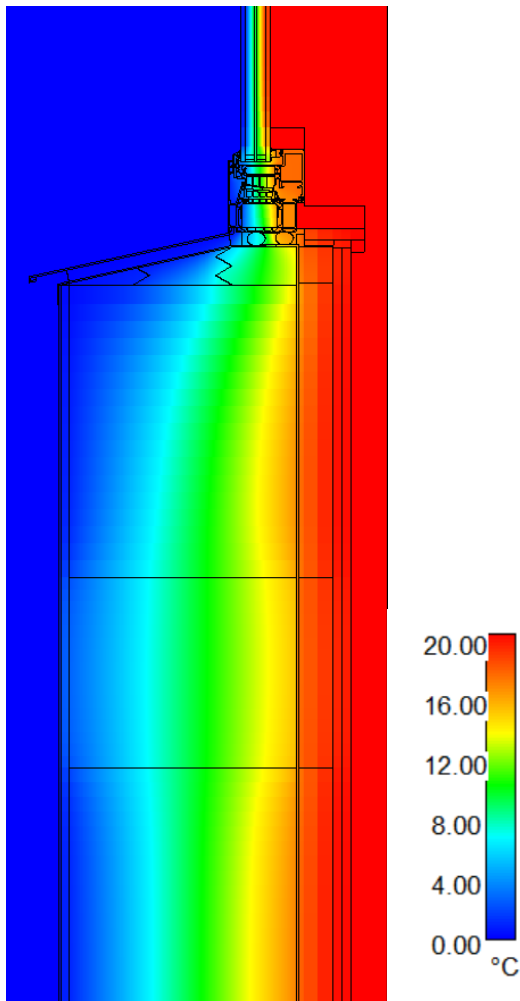
2.4.4 Numerisk beregning

Den siste og mest nøyaktige metoden for å beregne kuldebroer er ved bruk av dataprogrammer. Det er bruk av rent numeriske metoder som deler inn konstruksjonsdetaljen i mange små beregningselementer. Metoden er gjerne kjent som elementmetoden, og for varmestrømmen løses differensialligningene i anvendt tilfelle i to dimensjoner for et stasjonært tilfelle. Med stasjonær beregning menes at grensebetingelsene er konstante over tid. Hvert element av et materiale får tildelt spesifikke termiske egenskaper. Noder binder sammen elementene og danner store ligningssystemer. Det må brukes dataprogram for å løse ligningssystemene fordi beregningene blir for komplekse å løse for hånd. Desto flere noder eller elementer konstruksjonen er delt opp i, jo mer nøyaktig forventes det at systemet er.

Imidlertid er stabilitet og konvergens av ligningssystemer noe som gjør at resultatet nødvendigvis ikke blir mer rett med finere oppdeling. Hvis konstruksjonsdetaljen er delt inn i veldig mange deler tar modellen lenger tid å beregne. Av den grunn er det lurt å variere rutenettet av elementer etter område. I områder i konstruksjonene hvor varmemstrømmen vil endre seg mest, deles modellen opp i mange elementer for å få en mest mulig nøyaktig tilnærming. I områder hvor varmemstrømmen er mer ensartet velges det større elementer. Dette gjør beregningsprosessen lettere for dataprogrammet, samtidig som resultatet blir mer nøyaktig. For å sjekke at beregningene er tilfredsstillende og resultatet konvergere kan man dele modellen inn i mindre elementer og kjøre nye beregninger av modellen gjennom flere omganger. Resultatene er tilfredsstillende om de ikke forandres særlig av endringen på elementdimensjonene. Grensebetingelser og overgang mellom materialer er fysisk sett forenklet i en numerisk modell sammenlignet med virkelighet. Regler for hvordan beregning av kuldebroverdier ved numerisk beregning er beskrevet i NS-EN ISO 10211:2017.

Det finnes flere numeriske dataprogrammer som kan regne ut varmemstrøm og kuldebroverdier gjennom konstruksjoner. THERM, HEAT2, HEAT3, WinIso2D og WinIso3D er eksempler på to- og tredimensjonale programmer som for eksempel kan regne ut U-verdi til bygningsdeler, kuldebroverdier, samt temperaturfordeling i og på overflaten til konstruksjoner (Decheva, 2012). I denne oppgaven er det tyske programmet WinIso2D anvendt. Fremgangsmåten for å beregne kuldebroverdier med programmet er nærmere beskrevet i metodekapittelet.

Viktige parametere som må legges ved en slik beregning er mål og dimensjoner til modell, materialeegenskaper som er brukt, temperaturer og varmeovergangsmotstand til overflater. Resultatet kan presenteres som utskrift av isotermer. Figur 6 viser et beregningseksempel på temperaturfordelingen i en konstruksjon fra WinIso2D.



Figur 6 Isoterm av vindusinnsetting. Fargene står for ulike temperaturer i konstruksjonen.

2.6 Måling og registrering av kuldebroer

I dette kapittelet blir ulike metoder å måle og registrere kuldebroer beskrevet. Noen metoder å måle og registrere kuldebroer på er ved laboratoriemålinger, temperaturmålinger i felt og termografering. Under kommer en nærmere beskrivelse av de ulike metodene.

2.6.1 Laboratoriemålinger

Termisk konduktivitet for materialer i et laboratorium måles gjerne i en hot-box eller et lignende system (hot plate) der en har kontroll på varmestrømmen (SINTEF Byggforsk, 2012). En hot-box består i prinsippet av to celler eller kamre med en mellomliggende vegg. Det er denne veggen eller dette mellomstykket som er testmaterialet eller testkonstruksjonen. Hvert siderom, eller celle har full temperatur og klimakontroll med sirkulerende luft slik at en celle har samme temperatur. Det vil si at når et materiale eller en veggkonstruksjon testes, er temperaturen i "rommet" og inn på veggflaten den samme.

En hot-box brukes i tester av produkter for å dokumentere varmeegenskaper og blir gjerne kjørt med standard grensebetingelser, 20 °C på varm side og 0 °C på kald side. Hot-boxen er ofte et akkreditert varmestrømsapparat.

I et laboratorium eller på endelige fulle konstruksjoner kan en også måle varmestrøm. Dette er platesensorer i små og stor utførelse som gir en elektrisk respons proporsjonal med energistrømmen (Hukseflux Thermal Sensors, 2015).

Numeriske modeller som er tilpasset standard NS-EN ISO 10211:2017 kjører også modell med grensebetingelser slik at de fysisk representerer samme temperaturfordeling på flater som testet i laboratorium. I et normalt rom uten varme i gulv, vil en ha varmere luft oppe under taket og kaldere ved golvet, og ulik overflatetemperatur på innside yttervegg sammenlignet med en termometer stående i rommet. En vil dermed ha vanskeligheter med å kunne få tilsvarende målinger i felt som i et laboratorium.

Numeriske modeller brukes for å teste to- og tredimensjonale geometrier og sammensatte konstruksjoner på en raskere metode enn om en skulle studere disse effektene ved modellstudier i et laboratorium. Typisk er dette overganger mellom materialer med ulike tykkelser og varmetekniske egenskaper som gir kuldebroer. Hver for seg kan materialet i en vegg og et vindu enkelt beskrives som et 1-d(endimensjonalt) problem som enkelt kan håndregnes. Ved sammensetning forskyves varmestrømmen i overgang mellom materialene.

2.6.2 Temperaturmåling i felt

Ved å måle temperaturen på innvendige overflater ved en kuldebro vil det kunne si mye om hvor stor kuldebrovirkningen er i området (Byggdetaljer 720.015(Utgått), 1999). Målingen blir i større grad brukbar hvis utetemperaturen er lavest mulig, samt at temperaturen både inne og ute har vært stabile i tiden før og under målingen. Det kommer av at det er lettere å oppdage temperaturforskjeller i konstruksjonen når forskjellen på inne- og utetemperaturen er størst mulig, i tillegg til at kuldebroer ofte er forbundet med materialer i tunge konstruksjoner, som for eksempel betong. Materialet sin varmekapasitet vil da spille en sentral rolle. Betong bruker langt tid til å bli varmet opp og kan holde på varme i lenger tid.

Utetemperaturen varierer mye fra årstider og gjennom et døgn. Det gjør at temperaturforskjellen på kald og varm siden av konstruksjonene varierer mye. Av den grunn er det nødvendig å måle temperaturer over lenger tid for å kunne gi et mest mulig nøyaktig varmetap for konstruksjonen (Edvardsen & Ramstad, 2014). Bruk av loggeutstyr vil kunne måle temperaturer over lenger tid. Gjentatte målinger på bestemte punkter over tid vil gjøre de målte verdiene sikrere. For å kartlegge eventuelle feilkilder ved måling av overflatetemperaturen vil en sammenstilling av temperaturutviklingen sammen med lufttemperaturen inne og ute, samt bruk av bygning og vær osv. avdekke mye.

Det er mulig å bruke målte overflatetemperaturen ved kuldebroer til å estimere varmetapet en kuldebro avgir (Byggdetaljer 720.015(Utgått), 1999). Det kan gjøres etter følgende formel:

$$f_s = \Delta\theta_s \cdot \alpha_{si} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6)$$

Hvor:

θ_s : temperaturforskjell mellom målt innetemperatur og målt overflatetemperatur [K]

α_{si} : innvendig overgangstall ($\alpha_{si} = 1/R_{si}$) [W/(m²K)]

Ved å skrive om formelen er det mulig å få uttrykt estimert varmetap som estimert kuldebroverdi ved å multiplisere med høyden til monteringsfugen og dele på temperaturdifferensen mellom målt inn- og utetemperatur. Monteringsfuge er i oppgaven

omtalt som området mellom vegg og vindu som tilslutter bygningsdelene. Bruk av høyden til monteringsfugen er en forenkling av området for kuldebro ved vindusinnsetting.

$$\Psi_m = \frac{\Delta\theta_s \cdot \alpha_{si} \cdot h}{\Delta T} \text{ [W/(mK)]} \quad (7)$$

Hvor:

θ_s : temperaturdifferanse mellom målt innetemperatur og målt overflatetemperatur [K]

α_{si} : innvendig overgangstall ($\alpha_{si} = 1/R_{si}$) [W/(m²K)]

h: høyde monteringsfuge [m]

ΔT : temperaturdifferanse mellom målt inn- og utetemperatur [K]

Det er viktig å påpeke at dette bare er et omtrentlig resultat på varmetap og kuldebroverdi siden det er stor usikkerhet i hva den reelle innvendige varmeovergangsmotstanden er. I beregningen brukes en anbefalt verdi av innvendig varmeovergangsmotstand i henhold til NS-EN ISO 6946:2017.

2.6.3 Termografering

Et varmekamera kan være et godt hjelpemiddel til å få en oversikt over de termiske forholdene i en bygning. Det kommer av at det er stor sammenheng mellom overflatetemperaturen og langbølget varmeavstråling til et objekt (Byggdetaljer 474.642, 2014). Varmekamera kan brukes til å fange opp varmetap fra luftlekkasjer og kuldebroer, fukt i konstruksjoner, mangel på isolasjon i en bygning, samt å se at tekniske installasjoner fungerer som de skal. I tillegg kan et varmekamera brukes til å se hvordan strålingsegenskapene (emissiviteten) til overflatene i bygning er, men da trengs også nøyaktige temperaturmålinger fra for eksempel termoelement. Likevel er det viktig å merke seg at termografering ikke er et nøyaktig måleinstrument som kan brukes til å beregne varmeisolasjonsevne, U-verdi eller størrelse på luftlekkasjer. Det kommer av flere usikre variabler knyttet til termografering. Det er flere faktorer som gir større usikkerhet på termograferingen ute enn inne. Et varmekamera gir det beste og mest nøyaktige resultatet ved å termograferere fra varm side av bygningskroppen.

Strålingsintensiteten som kameraet fanger opp avhenger mest av overflatetemperaturen til objektet, men også andre materialeegenskaper påvirker intensiteten på varmestrålingen. Noen materialer emitterer, transmitterer og reflekterer stråling forskjellig. En gjennomsiktig flate vil transmittere stråling, i tillegg til å emittere og reflektere stråling. En ugjennomsiktig flate vil kunne emittere og reflektere stråling. Hvis et materiale har høy emissivitet, det vil si 0,85 eller større, kommer det meste av strålingen fra temperaturen til materialet. Høy emissivitet kjennetegnes ofte ved en matt overflate.

Termograferingskameraer finnes i ulike kvaliteter med store prisforskjeller. Hvordan oppløsning, følsomhet og funksjonalitet kameraet har varierer stort. Det er en utfordring å ta et godt bilde med varmekamera, så det trengs trening. De beste varmekameraene korrigerer for varmestrålingen fra selve kameraet. Overflatetemperaturen til objektet finner kameraet basert på den målte strålingsintensiteten, samt innstillinger på kameraet. De vanligste innstillingene på varmekamera er emissivitet og avstand til objekt, samt nivå og oppløsning på fargeskala.

Når en skal tolke et termogram, er det flere ting å bemerke seg. De fargene som opptrer i bildet er kunstige og fremstilt av kameraet. Det er en fordel å ha et vanlig fotografi av samme objekt ved siden av termogrammet. Det gjør det lettere å sammenlikne de to bildene, og forstå termogrammet. Det er rekke forhold som kan påvirke termografering. Under er en nærmere beskrivelse av disse forholdene.

Materialer som glass og metaller reflekterer mye varmestråling. Speilbildet av fotografen kommer med på både termogrammet og ofte fotografiet. Det gjør at temperaturene som kommer frem på termogrammet av glassruten ofte er upålitelige. Temperatur hentet fra termogrammet over reflekterende flater bør derfor verifiseres med andre temperaturmålinger. Varmekilder i nærhet til termografert objekt vil kunne forstyrre termograferingen. Overflatene vil emittere, reflektere, transmittert stråling, som kan gi utslag på termogrammet.

Været og driftsforhold kan ha stor påvirkning på termografering. Det er en fordel å bruke varmekameraet i vinterhalvåret når det er størst forskjell i inne- og utetemperatur.

Værforholdet bør ha vært stabilt før termografering. Termogrammet er lettere å lese når variasjonene i fargene fra varmestrålingen er større. Det å oppdage potensielle varmetap i konstruksjonen blir da enklere. Det bør være mer enn 10 °C temperaturforskjell mellom inne- og uteluft når en ser etter kuldebroer eller mangel på isolasjon.

Lufthastigheten ved overflater gjør at varmeovergangsmotstanden mellom luft og materiale øker ved lav lufthastighet og minker ved høy lufthastighet. I innvendige hjørner vil lufthastigheten være lavere enn midt på en veggflate. Det vil resultere i en lavere overflatetemperatur i dette området. Refleksjonsstrålingen fra omgivelsene vil også være lavere innerst i hjørnet. Av den grunn er det nødvendigvis ikke en kuldebro i et potensielt innvendig hjørne, selv om det fremstår det av termogrammet. Figur 37 i Vedlegg A viser nettopp dette fenomenet.

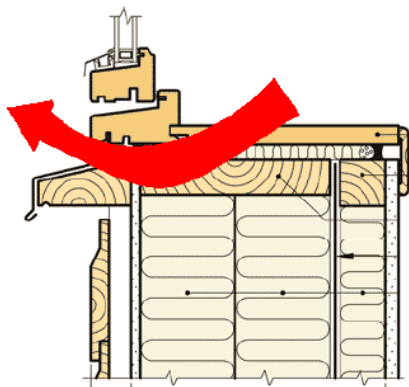
Direkte sollys på konstruksjonen vil gi en økning i temperaturen på forskjellige flater og materialer. Denne endringen i temperatur vil gjøre det vanskeligere å tolke termogrammet. Av den grunn bør det termograferes når det er overskyet og på nordvendte konstruksjoner.

Mye vind under termografering kan ha både positiv og negativ effekt, men som regel er det ugunstig med vind under termografering. Isolasjonseffekten til ulike materialer vil reduseres med vind inn i materialet, samtidig vil vind kunne oppdage feil eller mangler ved vindspærren.

2.7 Kulebro ved vindusinnsetting

Kuldebro ved vindusinnsetting betraktes som området i overgangen mellom vindu og vegg (SINTEF Byggforsk, 2009). Det er både endringen i materialtykkelse og av materialbruken som forårsaker kuldebro i overgang mellom vindu og vegg. Det kommer av at overgangen fra isolert vegg til glassrute utgjør en stor forskjell i tykkelse. I tillegg består vinduer stort sett av materialer som for eksempel glass og aluminium som har mye større varmeledningsevne enn isolasjonsmateriale som er i veggen. Det er derfor viktig at materialet i monteringsfugen som kobler sammen vegg og vindu er av mindre varmeledende materialer.

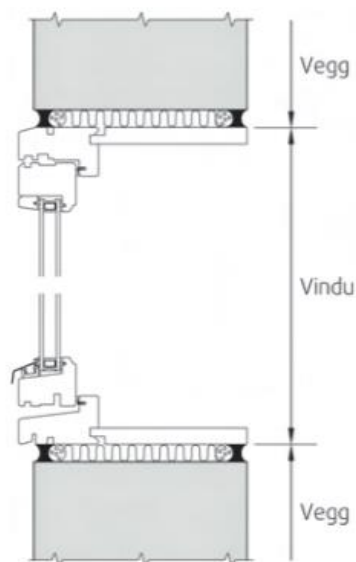
Kuldebro ved vindusinnsetting utgjør ofte et stort varmetap sammenliknet med andre kuldebroer (Bjørnulf & Bryn, 2017). Det kommer av at summen av omkretsene rundt alle vinduer utgjør mange løpemetere, samtidig som kuldebroverdien rundt vinduet ofte er relativt stor. Det gjør at kuldebroen kan ha stor innvirkning på den normaliserte kuldebroverdien for en bygning (Byggdetaljer 471.015, 2008). Potensielt kan kuldebroen ved vindusinnsetting utgjøre en stor andel av den normaliserte kuldebroverdien. Det kommer av at en bygning kan ha et vindus- og dørareal opp til 25 % av oppvarmet BRA (Byggteknisk forskrift, 2017a). Figur 7 illustrerer kuldebro ved vindusinnsetting.



Figur 7 Kuldebro som oppstår ved vindusinnsetting. Det er både materialtykkelsen og -bruken som forårsaker kuldebroen (SINTEF Byggforsk, 2009).

2.7.1 Beregningsgrunnlag

Ved beregning av varmetap skal innvendig arealer benyttes (SN/TS 3031:2016, 2016). Det vil si at lengden på lineær kuldebro rundt vindu regnes på innvendig side av ytterkonstruksjonen. Ved å bruke andre mål vil det gi ulike kuldebroverdier (Byggdetaljer 471.015, 2008).



Figur 8 Avgrensninger av innvendig mål ved beregning av kuldebroer ved vindusinnsetting (SINTEF Byggforsk, 2008).

I henhold til Byggteknisk forskrift (TEK17) skal U-verdier til bygningsdeler beregnes som et gjennomsnitt for de ulike bygningsdelene. Det vil si at arealer som naturlig inngår i en bygningsdel skal inkluderes i U-verdien. For vinduer skal ruten, karmen og rammen inkluderes i vindusarealet og U-verdien til vinduet. Arealet til veggen måles helt opp til underkant av vinduskarm som Figur 8 viser (SINTEF Byggforsk, 2008). U-verdien til veggen inkluderer bæresystem med stendere, losholt og andre forsterkninger, men monteringsfugen tas ikke med i beregningen av U-verdien til veggen.

Faktisk kuldebroverdi rundt vinduer vil kunne være forskjellig ved bunn- topp- og sidevinduprofil. Det kan komme av kaldras fra ruten. Når glassflaten blir kald på grunn av kald uteluft, faller luften foran vinduet ned mot bunnkarmen siden kald luft er tyngre enn varm. Det gjør at temperaturen på bunnvinduprofil som regel er kaldere enn topp- og sidevinduprofil. En annen grunn er at det kan være at luft opp mot taket er varmere enn nede ved gulvet. Det kan også komme av ulik innfesting, beslag og omramming.

Leverandører av vinduer, dører og glassfasader skal etter standarden NS 3031 kunne dokumentere U-verdi på sine produkter for hvert enkelt produkt (Bjørnulf & Bryn, 2017). I dokumentasjonene skal det fremkomme beregninger av kuldebroverdier for aktuell detalj, samt kunne referere til kuldebrokataloger, standardverdier og laboratorietest av prøveelement. Det er viktig at det her kommer frem hvilke deler og overganger som tilhører ulike kuldebroer.

2.7.2 Faktorer som kan påvirke kuldebro ved vindusinnsetting

En god vindusinnsetting er viktig for å få et godt fungerende vindu, men også en bra bygning. Det er flere faktorer som påvirker størrelsen på kuldebro ved vindusinnsetting (SINTEF Byggforsk, 2009). Det ene er selve konstruksjonen med tilstøtende konstruksjonselementer med vindu og vegg. Det andre er hvor i vegglivet vinduet er plassert. En annen faktor er hvordan monteringsfugen i vindusinnsettingen er utformet. Sist men ikke minst hvordan monteringen av vinduet er utført på byggeplass. I hvor stor grad hver enkel av faktorene påvirker kuldebroverdien er ofte vanskelig å si, men i praksis så er kuldebroverdien et resultat av en kombinasjon av disse faktorene. I kapitlene under kommer en forklaring på de ulike faktorene som kan påvirke kuldebro ved vindusinnsetting.

Utforming av vindu

Hvordan vinduet er utformet vil påvirke kuldebroverdien ved vindusinnsetting. Det kommer av at U-verdien til vinduet er med i beregningen av den lineære kuldebroverdien ved vindusinnsetting. I overgangen mellom ruten og karmen, og karmen og rammen er det interne kuldebroer i vinduet. Kuldebroene er allerede inkludert i vinduets U-verdi, og tas derfor ikke med i beregningen av kuldebroverdien (SINTEF Byggforsk, 2009). Hvor stor U-verdi vindu har påvirkes både av utformingen av ruten og ramme- og karmprofilen av vinduet.

Ruten

I dag brukes det for det meste vinduer med tre lags glass som er en type isolerruter (Byggdetaljer 571.953, 2016). Det er stor forskjell på glassruter i vinduer, og hvor godt de isolerer mot varmetap. Oppbygningen av isolerruter består av forskjellige materialer. Rutene kan få ulike egenskaper ved å variere antall og tykkelse på glass, type avstandsprofil,

forsegling og gass mellom rutene, samt bruk av belegg på rutene. Figur 9 er et eksempel på utforming av en rute med tre lags glass.



Figur 9 Rute med tre lags glass og avstandslistor mellom glassene (Byggetaljer 571.953, 2016).

Glassene i isolerruter kalles gjerne for funksjonsglass, siden de kan leveres i ulike varianter etter ønsket egenskaper. De består som regel av kvaliteten floatglass. Kjentegn ved denne type glass er at det har like bra optiske egenskaper i alle retninger. I et vindu med flere glass vil det være strålingsutveksling mellom glassrutene (SINTEF Byggforsk, 2009). Ulike belegg på glassruter kan gi vinduene andre stålningsegenskaper.

Avstandsprofil kan bestå av metall, men det er nå mer vanlig med avstandsprofiler i isolerende materialer som plast- eller glassfiberprofiler. Det brukes også profiler i silikon eller plastisk fugemasse som tåler mer bevegelse. I tillegg kommer avstandsprofiler i ulike tverrsnittformer.

Forseglingen av rutene må være tett. Det er mest vanlig med dobbel forsegling. Det er påkrevd med dobbel forsegling på ruter med gass mellom rutene.

Luft-/gassrommene mellom glassene bidrar til god isolering. Varmeledningsevnen til luft er nesten like bra som de beste isolasjonsmaterialer (SINTEF Byggforsk, 2009). Det er likevel mest vanlig å bruke gassen argon siden det isolerer bedre enn luft. Gassene krypton og xenon kan også brukes og isolerer hakket bedre enn argon, men de anvendes lite på grunn av tilgjengelighet og pris.

Avstanden mellom glassene i ruten bør ikke være større enn 20 mm. Det kommer av at glassene i ruten blir mer utsatt for mekanisk påkjenning ved defleksjon, som igjen kan føre til brekkasje. Forskjellige temperaturer, lufttrykk og tykkelse på glassene kan føre til defleksjon av glassene. Solavskjermende og lys- og varmeregulerende glass blir ofte utsatt for mye varme. Det er derfor vanlig at det ytterste glasset som blir mest utsatt for sol er tykkere for å

unngå defleksjon, mens de andre glassene er av vanlig tykkelse. Når avstanden mellom glassene øker, vil det også føre til økt konveksjon mellom glassene.

Ramme- og karmprofiler i aluminium

Denne oppgaven tar for seg vinduer med rammer og karmen av aluminium. Aluminium er et metall med høy varmeledningsevne. Noe som fort resulterer i kuldebroer i konstruksjonen. Selv om aluminium er dårlig på å holde på varme, har materialet mange positive egenskaper. Vinduer med aluminiumsprofiler er stort sett vedlikeholdsfrie og har lang holdbarhet sammenliknet med vinduer av tre. For å være et metall er aluminium et lett materiale og har høy styrke i forhold til vekt.

Aluminium kan ses på som en ubegrenset resurs. Hele 8 % av jordskorpa inneholder ulike former for aluminium (Byggdetaljer 533.151, 2016). Hovedkilden for utvinning av aluminium er bauksitt. Det er en aluminiumrik malm. Den er dannet ved stedlig forvitring av feltspattrike bergarter i varme strøk. Prosessen med å fremstille aluminium er en energikrevende prosess og utvinningen gjøres ved elektrolyse (Store norske leksikon, 2018).

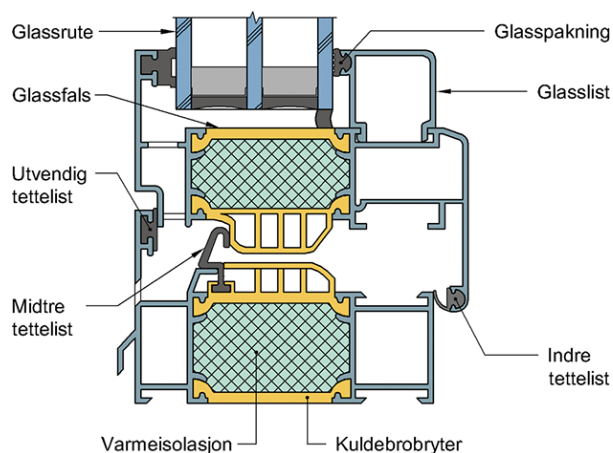
Aluminiumsproduksjonene fører til utslipp av CO² og andre klimagasser, særlig ved bruk av andre energikilder enn vannkraft. En fordel er at gjenvinning av aluminium bruker mye mindre energi enn fremstillingen av aluminium. Kun fem prosent av den totale energien som brukes til å fremstille aluminium brukes ved resirkulering. Kvaliteten på aluminium ved omsmelting endres lite, så det er stor fordel å gjenvinne materialet. I Tabell 2 på neste side er fordeler og ulemper med aluminium som konstruksjonsmateriale i vinduer.

Tabell 2 Fordeler og ulemper med aluminium som konstruksjonsmateriale i vinduer (Byggdetaljer 533.151, 2016).

Fordeler	Ulemper
Materialet er lett å forme til profiler og verktøykostnadene er små sammenliknet med produksjon av profiler i plast.	Dyrt sammenliknet med tre.
Aluminium er et lett material. Det har lav egenvekt.	Aluminiumproduksjon krever mye energi og slipper ut klimagasser.
Høy styrke og stivhet.	Materialet oppleves som kaldt.
Aluminium kan overflatebehandles for å få andre farger.	
Materialet kan sveises.	
Vinduene er bortimot vedlikeholdsfrie og det er ikke fare for råteskader, siden aluminium ikke korroderer.	
Kan gjenvinnes ved omsmelting uten å tape kvalitet.	
Prosessen ved gjenvinning er lite energikrevende sammenliknet med fremstilling av aluminium.	

Metaller endrer seg ved temperaturendringer. Ved en økning i temperatur vil materialet utvide seg, mens ved en temperaturreduksjon vil materialet trekke seg sammen. Av den grunn er det viktig å ta hensyn til dette ved montering av vinduer med aluminiumsprofiler (Byggdetaljer 523.701, 2018). Det er vanlig at hullene i festepunktene i karmen er avlange for at vinduene kan kunne bevege seg uten at det ødelegger innfestningen eller vinduet.

Designet av ramme- og karmprofiler til vinduer i aluminium tar utgangspunkt i behovet for styrke, drenering og varmeisolasjon (Byggetaljer 533.151, 2016). Utformingen for drenering i karmen er viktig. Det er risiko for at vann kan trenge inn igjennom glasset og glasspakning/tettelister. Mange vinduer er innad slående, som gir ekstra behov for drenering. Tettelister brukes mellom karm og glass, og mellom karm og ramme. De pleier å være laget av slikongummi eller EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomers) som er en annen type gummi. Levetiden til tettelister er som oftest kortere enn for resten av vinduet. Av den grunn må vinduet uformes slik at tettelistene kan byttes. Karmen er utformet slik at vann som kommer inn i karmprofilen gjennom tettelister i topp- og sideprofiler, vil bli ledet ut av karmen gjennom bunnkarmen. Varmeisolering av karmprofilene er nødvendig for å få akseptable overflatetemperaturer og U-verdier på karm og ramme. Det kommer av at aluminium er et materiale med høy varmeledningsevne. For å unngå kuldebroen mellom innside og utside profil settes det inn kuldebrytere. Dette er et mellomstykke som reduserer varmestrømmen gjennom profilen og samtidig holder profilen sammen. Kuldebryterne i profilene er som regel laget av plast, hvor polyamid ofte er brukt. Aluminiumsprofilen er delt inn i flere mindre luftkamre for å isolere bedre og hulrommene mellom kuldebryterne fylles med varmeisolasjon. Det er et større varmetap gjennom karm- og rammekonstruksjon enn gjennom selve ruten i vinduet siden karmen har en høyere U-verdi (SINTEF Byggeforsk, 2009). Denne utformingen av aluminiumsprofiler som beskrevet over, gjør at konstruksjonene får akseptable U-verdier, har en høy styrke og holdbarhet og en unngår fuktskader i vinduene.



Figur 10 Oppbygning av aluminiumsvindu. Vinduet er åpningsbart og slår innover (Byggetaljer 533.151, 2016).

Faktorer som påvirker varmetapet gjennom vindu

Under er det en oversikt over faktorer som påvirker varmetapet gjennom de forskjellige delene i et vindu og forhold.

Tabell 3 Faktorer som påvirker varmetapet gjennom et vindu (SINTEF Byggforsk, 2009).

Ruten	Karm/ramme:
<ul style="list-style-type: none">- Antall glass- Tykkelse per hulrom- Emisjonstall- Glasstype- Gasskonsentrasjon- Avstandslist/type/rutekanttap/ kuldebro(Ψ_g)- Mellomliggende sprosser/type/rutekanttap, kuldebro(Ψ_g)	<ul style="list-style-type: none">- Materiale/densitet/varmekonduktivitet- Profilbredde og -dybde- Profilutforming/falsdybde- Glassingslister- Glassingspakninger- Tettelister/antall/type/plassering- Hengsler og beslag/materiale/utforming/plassering- Materiale- Isolasjon – densitet- Varmekonduktivitet

I tillegg kommer vinduets størrelse med bredde og høye.

Utforming av veggkonstruksjon

Kuldebro ved vindusinnsetting påvirkes av veggkonstruksjonen. I beregningen av lineær kuldebroverdi er U-verdien til vegg med i beregningen. Tykkelsen på isolasjonslaget i veggen vil være den mest avgjørende faktoren for størrelsen på U-verdien, og det er bredden på isolasjonslaget som vil være bestemmende for tykkelsen på veggen. Bæresystemet i veggen er inkludert i U-verdiberegningen av veggen, og vil derfor påvirke denne verdien i stor grad. I tillegg vil varmekonduktiviteten til materialer i veggen være sentral. En økt tykkelse på veggen vil gi en lavere U-verdi på veggen, men samtidig vil dette føre til en økning i varmetransporten i overgang mellom vindu og vegg. Det vil kunne gi en økt kuldebroverdi.

Vinduets plassering i vegglivet

Ulike plasseringer av vindu i vegglivet har forskjellige konsekvenser. Grunnen for ulike plasseringer kan være arkitektoniske, behov for ekstra fuktsikring, varmetap ved kuldebro, innslipp av solvarme, fare for utvendig kondens eller rim, slitasje og vedlikeholdsbehov (SINTEF Byggforsk, 2009). Hvor i vegglivet det er mest gunstig å plassere vinduet er ofte en vurdering i forhold til fuktsikkerhet og varmetap. Under er to vanlige vindusinnsetninger presentert med fordeler og ulemper.

Plassering i flukt med vindspærren

Vinduet er plassert med sporet i bunnkarmen for vannbrettbeslag i flukt med vindspærren i veggen. Det er både fordeler og ulemper ved å plassere vinduet i flukt med vindspærren. I tabellen under er en sammenfattet oversikt over konsekvenser ved denne vindusinnsettingen.

Tabell 4 Fordeler og ulemper for vindusinnsetting i flukt med vindspærren (Byggdetaljer 523.701, 2018).

Fordeler	Ulemper
Enklere å utforme regn- og lufttette konstruksjoner	Høyere kuldebroverdi
Mer dagslys og solvarme	Økt fare for innvendig og utvendig kondens
	Økt slitasje og vedlikeholdsbehov av vinduet

Det blir enklere å bygge regn- og lufttette konstruksjoner med prinsippet om totrinnstetting, som vil si at regn- og lufttettingen er adskilt. Dreneringen og luftingen bak utvendigkledning blir optimal. Vann fra for eksempel slagregn vil føres bort fra konstruksjon og tørke opp raskt. Det vil minke risikoen for fuktskader i veggen nedenfor vinduet. Det kommer mer dagslys og solvarme inn gjennom vinduet, siden det er en liten utvendig vinduskarm. En ulempe ved denne plasseringen vil som regel være at den gir en høyere kuldebroverdi. Dette igjen resulterer i en lavere temperatur på rutekanten og et høyere varmetap. Plasseringen vil øke faren for innvendig og utvendig kondens og rim på utsiden av ruten. I tillegg vil plasseringen føre til økt slitasje og vedlikeholdsbehov av vinduet. Det er ikke anbefalt å flytte vinduet lenger ut enn vindspærren siden dette vil føre til høyt varmetap og større risiko for fuktskader.

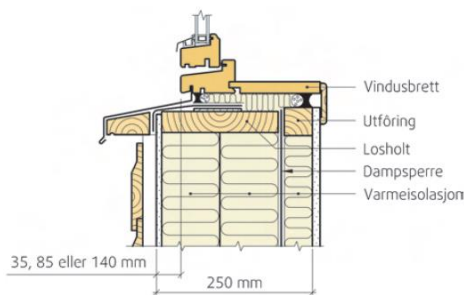
Plassering inntrukket i veggen

Vinduet er plassert en bit inn i isolasjonslaget. Det er både fordeler og ulemper ved å plassere vinduet inntrukket i vegglivet. I tabellen under er en sammenfattet oversikt over konsekvenser ved denne vindusinnsettingen.

Tabell 5 Fordeler og ulemper for vindusinnsetting inntrukket i veggen (Byggdetaljer 523.701, 2018).

Fordeler	Ulemper
Lavere kuldebroverdi	Økt fare for vannlekkasjer og fuktskader i veggen
Faren for innvendig og utvendig kondens minker	Det blir vanskeligere å utforme regn- og lufttette konstruksjoner
Vinduet er mer beskyttet mot vær, vind og sol	

Ved å plassere vinduet inntrukket i vegglivet vil det som regel gi en lavere kuldebroverdi enn ved at vinduet er plassert i flukt med vindsperren. En lav kuldebro vil gi et påfølgende lavt varmetap. Faren for utvendig kondens vil også minke. Det kommer av at den utvendige vinduskarmen blir større og vil skjerme for kulden som kommer mot kvelden. I tillegg vil faren for innvendig kondens minke. Det skyldes at kanten rundt glassruten og den innvendige overflaten til vinduet blir varmere, fordi vinduet er nærmere varmekilden i rommet. Vinduet vil være mer beskyttet mot vær og vind, og vinduet holder seg varmere og tørrere. Det vil gjøre at vinduet får en lenger levetid. Vinduet vil også være mer skjermet mot sola, noe som vil redusere varmestrålingen fra sola. Det er ofte en fordel i store bygg som for eksempel næringsbygg i Norge hvor det er både er overskuddsvarme og kjølebehov. Det vil også være ulemper ved denne plasseringen. Faren for vannlekkasjer og fuktskader i veggen vil øke siden oppkanten til vannbrettbeslaget er festet innenfor vindsperresjiktet i veggen. Det vil også bli vanskeligere å montere og regn- og lufttette vinduet med fuging og membran. Det vil derfor være viktig med en god fuktsikring under karm og vannbrettbeslag ved denne plasseringen.



Avstand fra utside av vindsperre (gipsplate) til utvendig kant av vinduskarm (mm)	ψ W/(mK)
- 42 (vinduet stikker ut)	0,05
0	0,02
35	0,01
85	0,02
140	0,03

Figur 11 Ulike vindusinnsetninger av trevindu i vegg av bindingsverk av tre med tilhørende kuldebroverdier (Byggedetaljer 471.015, 2008).

Som nevnt over er en inntrukket plassering i vegglivet bedre for å minimere kuldebroverdi. Det ser en ut fra Figur 11 over ulike vindusinnsetninger med tilhørende kuldebroverdier. Her ser en at en plassering av vinduet 35 mm fra utside vindsperre inn i vegglivet til utvendig kant av vinduskarm vil være den beste posisjonen for å minimere kuldebroverdien. En plassering av vinduet utenfor vindspennen eller en helt inntrukket plassering av vinduet i vegglivet vil gi dårligere kuldebroverdier.

Utforming av monteringsfugen

Mye av tilleggsvarmetapet fra kuldebro ved vindusinnsetting finner sted gjennom monteringsfugen mellom vindu og vegg. Monteringsfugen kobler sammen vindu og veggkonstruksjonen. Det er viktig at dette festet er solid. Da vil vinduet holdes på plass i mange år. Oppbygningen og hvilke materialer som er brukt i fugen, har påvirkning på hvor stor kuldebroverdien blir. Fugen vil være mest betydningsfull i bygninger med tykke isolerte vegger enn i dårlig isolerte hus, siden kuldebroverdien som regel er større i godt isolerte bygninger (Bjørnulf & Bryn, 2017). Oppbygningen av fugen kan variere mye fra ulike konstruksjonsdetaljer, men monteringsfugen består som regel alltid av noen spesifikke komponenter. Det er for eksempel isolasjon, bunnfyllingslist, vann- og lufttetningsmaterialer og vannbrettbeslag (Decheva, 2012). Det er viktig at materialene har gode termiske egenskaper med lav varmeledningsevne. I tillegg er det viktig at fugen utformes regn- og lufttett for å unngå at luft og fukt slipper inn i konstruksjonen og skaper fuktproblemer.

Utførelse på byggeplass

Kvaliteten på oppbygning av konstruksjonene på byggeplass har stor påvirkning på kuldebroverdien. Oppbygningen av vegg og montering av vindu er ofte gjort av forskjellige

fag på byggeplass (Bjørnulf & Bryn, 2017). Det gjør at kuldebroen i overgangen mellom vegg og vindu er avhenger av to parter som må legges til rette for hverandre. Det er viktig at både vindu- og veggdetaljen har en god beskrivelse på hvordan de skal utformes, men like viktig er det at beskrivelsen til veggen inkluderer hvordan tømmeren skal legges til rette for montøren slik at montasjen gjennomføres slik den skal. Hvordan dampspærren og eventuelt en vindsperre er tilsluttet vinduet er faktorer som kan påvirke både kuldebroen og fuktsikringen. En dårlig utført overgang mellom vegg og vindu vil ikke bare gi et økt varmetap med høyere kuldebroverdi enn beregnet. Det kan også oppstå uønskede luftlekkasjer som kan skape fuktproblemer i konstruksjonen. Det er derfor avgjørende at noen følger opp montasjen av tilslutningen mellom bygningsdelen, som at den er prosjektert på en god måte.

2.7.3 Tiltak for å redusere varmetap

Det er flere tiltak som kan redusere kuldebro ved vindusinnsetting eller varmetap fra bygninger. I dette kapittelet blir etterisolering av ramme- og karmprofil som tiltak for å redusere kuldebro og etterisolering av innvendig vegg for å redusere varmetap nærmere beskrevet.

Isolering av ramme- og karmprofil

Det er mulig å redusere en kuldebro ved å tilleggisolere ramme- og karmprofil på enten inn- eller utsiden av konstruksjonen (SINTEF Byggforsk, 2009). Denne løsningen vil gi en bedre U-verdi for ramme- og karmprofil, som gjør at den totale U-verdien til hele vinduet blir lavere, i tillegg til at kuldebroen i overgang vegg og vindu minker. Ved innvendig isolering rundt karmen vil temperaturen i hele karmprofilen reduseres (Bjørnulf & Bryn, 2017). Det vil føre til en økt fare for kondens i området rundt karmprofil og glass. Av den grunn må det tas en vurdering på hvor stor kondensfare en tilleggisolering på varme side vil føre til. Ved å isolere på utsiden av konstruksjonene vil temperaturen i ramme- og karmprofilen øke. Dette vil være den beste løsningen for å minske varmetapet, men løsningen vil også kunne gi noen negative konsekvenser. Isoleringen vil kunne være i veien for dreneringsåpningen i karmen, samt at tilslutningen mellom isoleringen og karmen må være tett for å unngå fuktproblemer i veggen.

Innvendig og utvendig isolering av vegg

Etterisolering av innvendig eller utvendig vegg vil redusere varmetapet gjennom vegg, ved at U-verdien til veggen reduseres, mens kuldebroverdien vil kunne øke. Det kommer av at en større andel av varmetapet fra veggen vil flyttes til vindusinnsettingen. Etterisolering av innvendig vegg kan føre til at kondens og duggpunkt flyttes inn i vegg. Det vil da være bedre å isolere utvendig vegg siden kondens vil flyttes ut i veggen og faren for fukt minker. En annen ulempe ved etterisolering av vegg er at komforten ved vinduet kan bli dårligere. Veggen blir varmere og vinduet vil oppleves som kaldere. Det vil derfor kunne oppleves som kaldere å være nærmere vinduet enn før etterisoleringen.

3 METODE

Metodekapittelet tar for seg hvilken forskningsmetode som er brukt for å løse problemstillingen og hvordan den er utført.

Oppgaven skal løses ved bruk av en kvantitativ forskningsmetode. Det innebærer å bruke data som kan tallfestes (Dalland, 2012). Dataene skal hentes fra feltarbeid og modellering i et dataprogram. Metoden består av å samle inn måledata over temperaturer i området rundt kuldebro ved vindusinnsetting og gjøre varmestrømsberegninger i et numerisk beregningsprogram av konstruksjonene som det er gjort målinger på. Videre å gjøre varmestrømsberegninger på konstruksjonene etter noen alternative tiltak. Tilslutt skal dataen behandles, presenteres og analyseres. Målet med både feltarbeidet og modelleringen er å kartlegge varmegjennomgangen i grensesnittene mellom vegg og vindu og se hvordan ulike tiltak vil påvirke kuldebroeffekten.

Feltarbeidet og modelleringen er gjennomført på to ulike bygg med aluminiumsprofiler fra Schüco. Det ene er Campus Ås, det nye veterinærbygget som skal stå ferdig høsten 2019. Det andre bygget er Sørhellinga som er en annen universitetsbygning på Ås. Sørhellinga ble ferdig rehabilitert i 2008. Byggene ble valgt på bakgrunn av at de har vinduer med aluminiumsprofiler fra Schüco. Bygningene har forskjellige aldre, samt at byggene har svært ulike vinduer, veggkonstruksjon og vindusinnsetting. Tanken bak å velge to prosjekter som skiller seg fra hverandre, var at det kan bli lettere å se hvilke faktorer som påvirker kuldebroeffekten ved vindusinnsetting. Det er mer vanlig med vinduer med aluminiumsprofiler i næringsbygg enn i boligbygg. Av den grunn er begge byggene som er valgt for oppgaven næringsbygg. Under er nøkkelinformasjon over bygningene Campus Ås og Sørhellinga.

Campus Ås

- Nytt veterinærbygg for Veterinærinstituttet og Veterinærhøyskolen
- Plassering på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), Ås
- Ferdigstilles i 2019, innflytting i 2020
- Areal på ca. 63 100 kvm
- Åtte sammenknyttede bygninger med til sammen 2400 rom

(Statsbygg, 2017)

Sørhellinga

- Universitetsbygg, undervisning og laboratorie.
- Plassering på Norges miljø- og biovitenskaplige universitet (NMBU), Ås
- Rehabiliterert ferdig i 2008
- Areal på ca. 10 000 kvm

(Planforum Arkitekter AS, 2008)

3.1 Feltarbeid

Målet med feltarbeidet er å samle inn data over kuldebroer ved vindusinnsetting og se om det er mulig å gjøre en vurdering på kuldebroer basert på målte luft- og overflatetemperaturer. Feltarbeidet ble gjennomført ved å gjøre målinger av overflatetemperaturer i områder rundt kuldebroene ved vindusinnsetting på både innsiden og utsiden av konstruksjon. Det ble også gjort temperaturmålinger av lufttemperaturen inne og ute. I tillegg ble kuldebroen termografert. Det ble benyttet flere forskjellige måleutstyr. I kapittelet under er en nærmere beskrivelse av dem.

3.1.1 Måleutstyr

Feltarbeidet ble gjennomført ved bruk av en temperaturlogger, varmekamera og flere termoelement.

Temperaturlogger

Det ble brukt to temperaturlogger til å måle lufttemperaturen inne og ute. De ble kjøpt inn i forkant av feltarbeidet fordi fakultetet ikke hadde slike målere tilgjengelig.

Temperaturloggerne er Temperatur- og fuktighetslogger for USB-tilkobling fra Clas Ohlson, modell ST-171. De ble stilt til å logge temperatur hvert tiende minutt og temperaturen logges med en oppløsning på tideler. Disse ble montert opp inne og ute ved bruk av tape. Den innvendige temperaturloggeren ble montert opp sentralt i rommet, mens den utvendige temperaturloggeren ble montert ute i forholdvis kort avstand til vinduet som det ble gjort målinger på. Det er viktig å påpeke at det er noe usikkerhet i forhold til kvaliteten på dette måleutstyret. Sensorene har uten kalibrering en nøyaktighet på ± 1 °C og en repetisjonsnøyaktighet på $\pm 0,2$ °C (Clas Ohlson, 2019). Testmålingene i forkant av arbeidet viste at sensorene var stabile og fulgte romtemperatur. Det ble besluttet at temperaturloggerne gir tilstrekkelig gode data.

Varmekamera

For å få en visuell dokumentering på kuldebro ved vindusinnsetting ble det brukt et varmekamera. Kameraet som ble brukt er av merket FLIR og modellen er T620BX. Det er et av de mest omfattende og avanserte termiske bildekameraene som er tilgjengelige på

markedet. Noen av innstillingene og funksjonene som kan stilles på i kameraet er avstand til objekt, emissivitet og temperaturskala. Kameraet har både automatisk og manuell fokusering og temperaturskala. I tillegg til at kameraet tar et termogram, tar det også et vanlig bilde for synlig lys.

Det er spesielt utfordrende å termografere vinduer og spesielt vinduer av aluminium. Det kommer av at både glass og metaller - her aluminium reflekterer mye varmestråling. Det gjør at termogrammer av vinduer har stor sannsynlighet for å være misvisende i forhold til overflatetemperaturer. Det ble tapet over en mørkere papirlapp på vindusruten. Tapen har en høy emissivitet og tilnærmet ingen refleksjon av varmestråling. Ved å sammenlikne området som er tapet og vindusruten ellers, vil det kunne gi en pekepinn på hvor mye av overflatetemperaturen fra vinduet som er reell eller bare reflektert varmestråling fra omgivelsene. Likevel tenkes det at varmekamera vil være et godt hjelpemiddel til å kartlegge temperaturforskjeller i konstruksjoner og gi et inntrykk på overflatetemperaturer.

Termoelement

Det ble brukt et termoelement til å måle overflatetemperaturer i området rundt kuldebro ved vindusinnsetting. Et termoelement er satt sammen av to ledningstråder bestående av forskjellige metaller (Store norske leksikon, 2014). I et punkt er de bundet sammen slik at de danner en strømkrets. Temperaturen måles ut fra spenningen som dannes i overgangen mellom materialene som øker eller minker når temperaturen endres. Fordelen ved å måle temperaturer med et termoelement, er at de ofte måler svært nøyaktige temperaturer, har rask responstid og kan måle temperaturer over et vidt spekter. I tillegg er de ofte små slik at de lettere kommer til steder som for eksempel termometere ikke kommer til.

Termoelementet er en TRSYS01 fra Hukseflux Thermal Sensors. Instrumentet har to termoelementpar, samt to varmeflukssensorer. I feltarbeidet ble bare termoelementparene benyttet. Varmeflukssensorene ble testet i det ene feltarbeidet, men plasseringen av varmeflukssensorene var lite optimalt plassert på karmen. Det ble derfor valgt å ikke gå videre med disse resultatene. Termoelementene er en type temperaturloggere. De var også stilt inn til å logge temperatur hvert tiende minutt. Absolut målt temperatur på en enkelt termoelementsensoren har ikke svært høy nøyaktighet (Hukseflux Thermal Sensors, 2015). Målt temperaturforskjellen til et termoelementpar har derimot bedre nøyaktighet enn +/- 0,1 °C.

To av de viktigste forhåndsreglene ved bruk av instrumentet er å måle på nordvendt fasade for å unngå dirkede oppvarming fra sola, samt at ingen varmekilde bør være i kort nærhet til måleinstrumentet. For eksempel bør ikke en måling gjennomføres på et vindu hvor det er montert en varmekilde i underkant av vinduet. Termoelementet er anbefalt å måle minst en dag for å få tilstrekkelig med måledata av temperaturen. Ved gjentatte målinger øker sannsynligheten for riktige temperaturverdier.

Det ene paret av termoelementene ble montert på inn- og utsiden av bunnrammen/-karmen til vinduene. Grunnen for at det ene termoelementparet ble montert på bunnrammen/-karmen er fordi kuldebroen som regel er mest kritisk her. Bunnprofilen er som regel kaldere sammenliknet med topp- og sidekarmer på grunn av kaldras fra ruten. I tillegg vil varmeovergangsmotstanden være noe lavere over kanten til bunnprofilen. Luftstrømmen fra kaldraset blir hindret når den treffer bunnrammen, og da får luften økt fart over kanten til vindusprofilen. Plasseringen på det siste termoelementparet varierte fra prosjektene på grunn av ulikheter i konstruksjonene og erfaring etter første måling. For å få festet termoelementene på utsiden av konstruksjonene uten å åpne vinduet som det ble gjort målinger på, ble termoelementene ført gjennom nabovinduet til utsiden av det aktuelle vinduet. Nabovinduet ble videre lukket så godt som mulig og tapet igjen uten at ledningene gjennom vinduet ble skadet.

3.1.2 Fremgangsmåte

I dette kapitlet kommer en beskrivelse av fremgangsmåten ved feltarbeidet. På både prosjekt Campus Ås og Sørhellinga ble temperaturmålingene og termograferingen gjennomført i rom med to åpningsbare vinduer i nærhet til hverandre. De var plassert på nordvendt fasade for å unngå dirkede oppvarming fra sola. Under er prosedyren på hvordan feltarbeidet ble gjennomført.

1. Montere opp temperaturlogger inn og ute
2. Innvendig termografering av vindusinnsetting
3. Montere opp termoelement

Under følger en sjekkliste fra termograferingen:

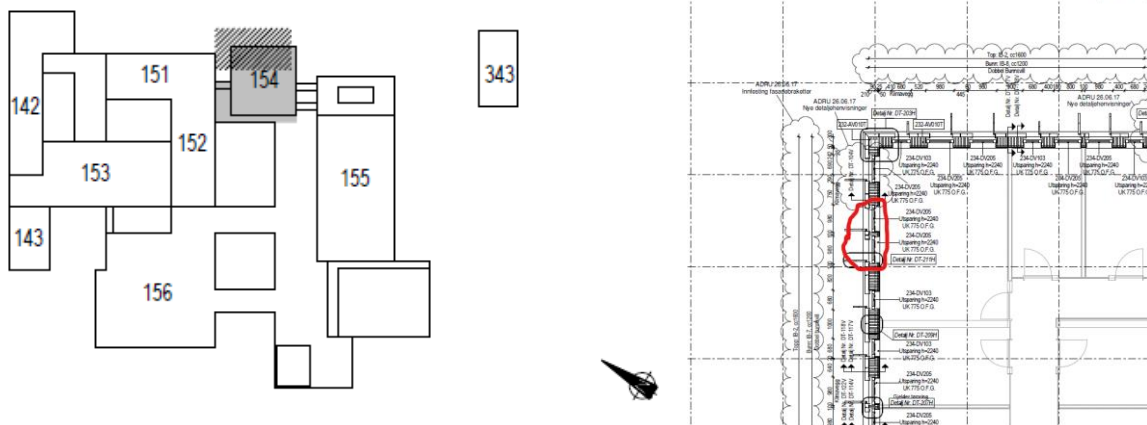
- Sette opp tapelapp på vinduet for å kontrollere emissiviteten til vinduet.
- Stille inn avstand til termograferingsobjektet og emissivitet på kameraet til $\epsilon = 0,95$.
- Finne omgivelsestemperaturen til rommet ved å hjelp av kameraet.
- Ta termogram av rommet for å kartlegge eventuelle forstyrrelser.
- Kontrollere uønskede strålingskilder som mennesker osv.
- Registrere været, er det sol, regn, vind osv.

Feltarbeidet på byggene Campus Ås og Sørhelling ble gjennomført noe forskjellig. Derfor kommer en nærmere beskrivelse og dokumentasjon fra feltarbeidet på de respektive bygningene.

Campus Ås

Campus Ås er fortsatt en byggeplass, men noen av byggene begynner å bli ferdigstilt.

Målingene på Campus Ås ble gjennomført på et åpningsbart kontorvindu vendt mot nordvest i 2. etasje i bygg 154. Kontoret som vinduene står i er et hjørnekontor, med vinduer på to vegger.



Figur 12 Oversiktskart over bygningsmassen på Campus Ås og plassering av gjennomført feltarbeid på plantegning (Fabel arkitekter & Henning Larsen Architects, 2015).

Kontoret som målingene ble utført på var stort sett ferdig, men det var fortsatt preget av å være byggeplass. Rommet ble brukt som lager og inneholdt materialer som var sentrert midt i rommet. Det var fortsatt provisorisk oppvarming av bygget, og det var ikke montert dør inn til

kontoret. Målingen ble utført over en helg for å unngå mest mulig forstyrrelser fra arbeidere og sikkert med tanke på tyveri av måleutstyret.

Tabell 6 Opp- og nedmontering av måleutstyr på Campus Ås.

	Utsetting av måleutstyr	Innhenting av måleutstyr
Dato	15.02.2019	18.02.2019
Tid	kl. 12:30 – 14:15	kl. 8:30 – 9:30
Vær	Tåkete og grått vær, 3-4 °C (fra Yr.no kl. 15:30)	Grått vært, 3-4 °C (fra Yr.no kl. 10:15)

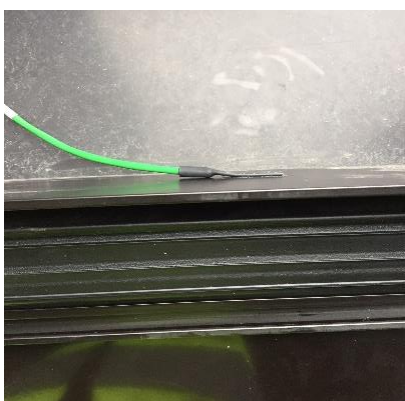
Under er noen bilder av monteringen av måleutstyret.



Figur 13 Bilde av vinduene som ble brukt under målingen. Termoelementene ble festet på det høyre vinduet, mens ledninger til utvendige termoelementer ble ført gjennom det venstre vinduet.



Figur 14 Bilde av hvordan temperaturlogger er montert på den faste solavskjermingen og ledning til utvendig termoelement er dratt mellom vinduene.



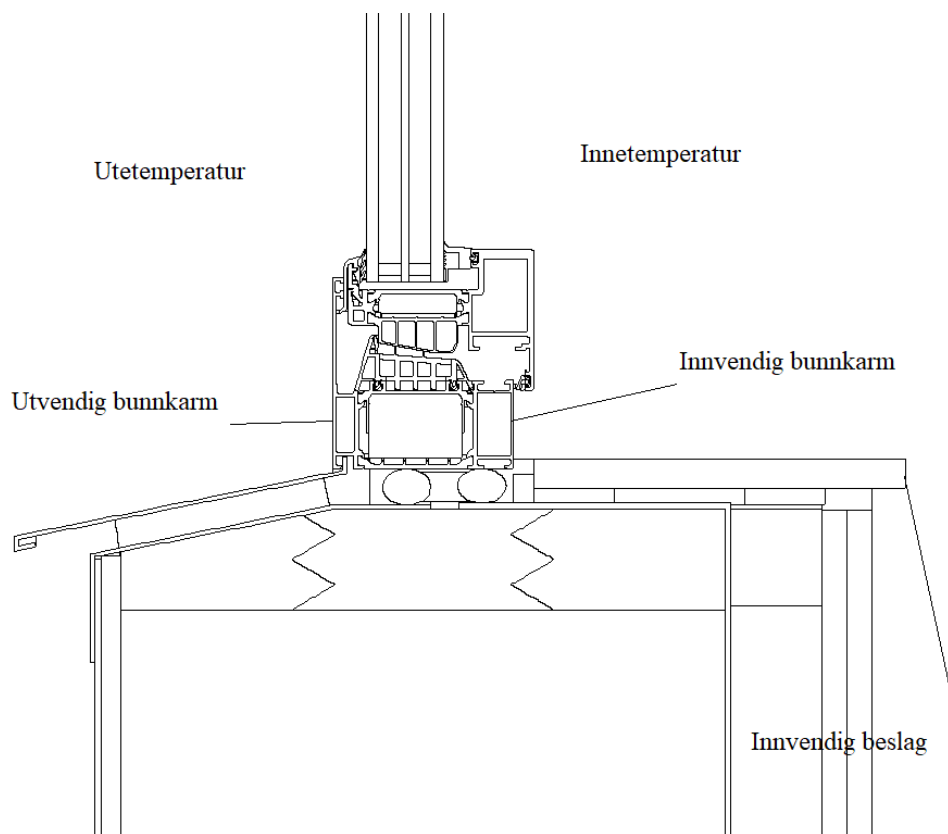
Figur 15 Bilde av hvordan termoelementene er montert til konstruksjon med en tynn dobbeltsidig tape. Figuren viser termoelementet på utside bunnkarm.

Temperaturloggeren som målte utvendig lufttemperatur ble tapet fast til den faste solavskjermingen som en ser i Figur 14. Den ble montert opp der først og fremst på grunn av sikkerhet mot tyveri og forstyrrelser fra mennesker på byggeplassen, samt at posisjonen får målt lufttemperaturen utenfor vinduet. Den innvendige temperaturloggeren ble tapet fast i en eske sentralt i rommet.

Termograferingene ble gjennomført både ved utsetting og innhenting av måleutstyr, og en ekstra gang den 21.02.2019. Den siste termograferingen ble gjennomført siden resultatet fra termograferingen de to første gangene hadde forbedringspotensial. Figur 13 viser hvordan et

område på ruten er tapet for å få et inntrykk av hva den reelle overflatetemperaturen på vinduet er.

Det ene termoelementparet ble montert opp på inn- og utvendig bunnkarm. Det andre termoelementparet ble montert opp under bunnkarm på innvendig beslag og utvendig beslag. Grunnen for at det andre termoelementparet ble montert i området nedenfor bunnkarmen til vinduet, var at plasseringen passer bedre i forhold til monteringsfugen til vindusinnsettingen hvor store deler av kuldebroen finner sted. Figur 15 viser hvordan termoelementene ble tapet fast med en dobbeltsidig tape til konstruksjonen. Figur 16 illustrerer vindusinnsetting på Campus Ås med plassering av målepunkter for termoelementene. Figuren mangler utvendig kledning. Målepunktet for utvendig beslag er ikke med på figuren siden det strekker seg over utvendig kledning.



Figur 16 Vindusinnsetting med plassering av målepunkter for termoelementer på Campus Ås. Figuren mangler utvendig kledning. Målepunktet for utvendig beslag er ikke med på figuren siden det strekker seg over utvendig kledning.

Sørhellinga

Målingene på Sørhellinga ble gjennomført i klasserom S121 i 2. etasje som er vendt mot nord. Vinduene på Sørhellinga er satt sammen av fasadeelement som danner vindusbånd i fasaden.



Figur 17 Plantegning av 2. etasje i bygget Sørhellinga med anvisning merket med rød ring hvor feltarbeidet ble gjennomført (MazeMap, 2019).

Klasserommet er møblert med bord og stoler for undervisning og har plass til ca. 30 elever. Målingen ble utført med en varighet på en uke. Det var undervisning i klasserommet på dagtid under ukedagene.

Tabell 7 Opp- og nedmontering av måleutstyr på Sørhellinga.

	Utsetting av måleutstyr	Innhenting av måleutstyr
Dato	12.03.2019	19.03.2019
Tid	kl. 7:30 – 9:15	kl. 9:00 – 10:00
Vær	Lett overskyet, -4 °C (fra Yr.no kl. 10:00)	Strålende sol og blå himmel, 2-3 °C (fra Yr.no kl. 11:00)

Under er et par bilder av monteringen av måleutstyret fra innsiden og utsiden.

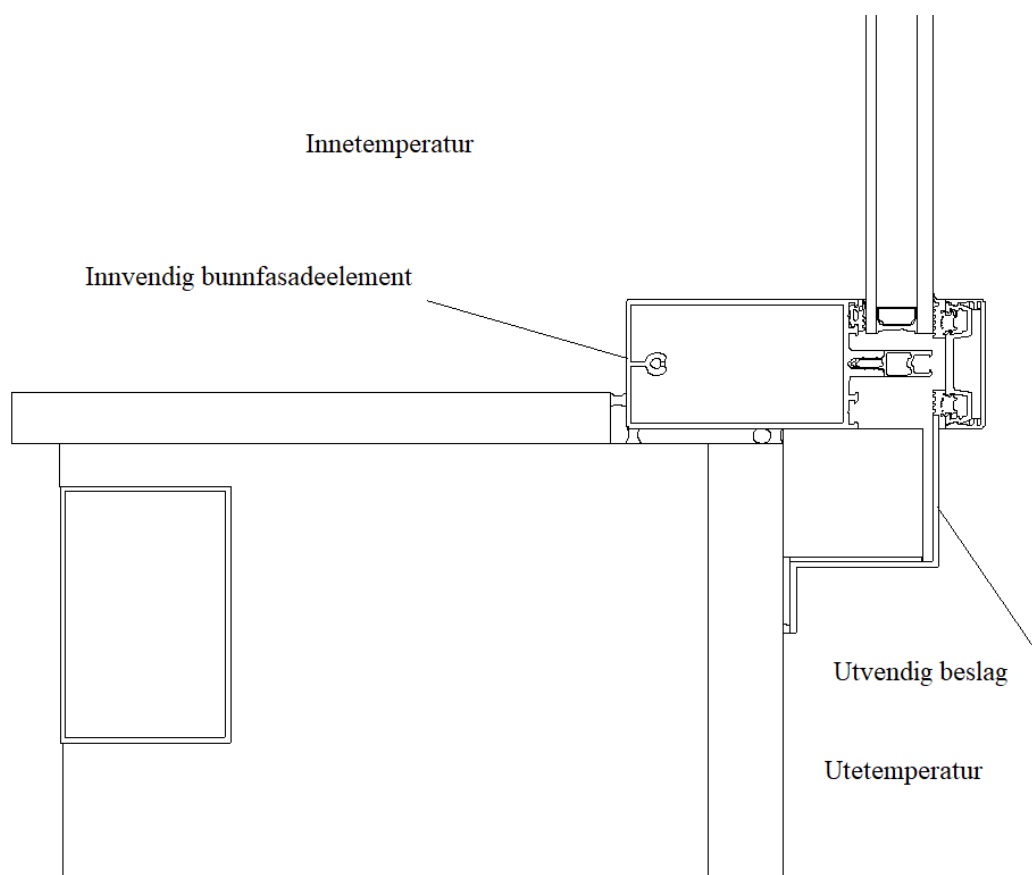


Figur 18 Innvendig og utvendig oppmontert feltarbeid på Sørhellinga. Målingene blir utført på vinduet til venstre sett innenfra, mens utvendig termoelement er dratt gjennom det høyre vinduet.

Den innvendige temperaturloggeren ble tapet fast i en luke i den ene skrivepulten i klasserommet. I Figur 18 på venstre bildet ser en hvordan den er tapet fast og stikker opp fra pulten. Den utvendige temperaturloggeren ble tapet fast i rømningstrappen som ligger utenfor resten av bygningskroppen til høyere for klasserommet sett ut gjennom vinduene. I Figur 17 av plantegning av Sørhellinga ser en rømningstrappene på nordsiden av bygningen.

Termograferingen ble gjort under utsetting av måleutstyret. Her ble det også et område på vindusruten tapet for å prøve å få et mer reelt inntrykk av overflatetemperaturen på ruten.

Det ene termoelementet ble montert opp på innvendig bunnfasadeelement, mens det andre parelementet ble montert opp i underkant av utvendig bunnfasadeelement på beslaget rundt isolasjonene under vindusprofilen. Grunnen for denne plasseringen av termoelementet var med tanke på at det er i dette området kuldebro ved vindusinnsetting i størst grad befinner seg. Det andre termoelementparet ble montert opp på inn- og utvendig sidefasadeelement. Det ble montert opp på sidefasadeelementet for å sjekke om det faktisk er kaldere på bunnkarmen enn sidekarmen på et vindu. Figur 19 på neste side illustrerer vindusinnsetting på Sørhellinga med plassering av målepunkter for termoelementene. Figuren mangler utvendig kledning. Målepunktene for innvendig og utvendig sidefasadeelement er ikke med på figuren siden dette er et vertikalt snitt av vindusinnsettingen.



Figur 19 Vindusinnsetting med plassering av målepunkter for termoelementer på Sørhellinga. Figuren mangler utvendig kledning. Målepunktene for innvendig og utvendig sidefasadeelement er ikke med på figuren siden dette er et vertikalt snitt av vindusinnsettingen.

3.1.3 Feilkilder ved feltarbeidet

Det er potensielt flere feilkilder ved fremgangsmåten og utførelsen av feltarbeidet som kan ha påvirket måleresultatene. Mulige feilkilder og utfordringer ved gjennomføringen av feltarbeidet er presentert i dette kapittelet.

Det har vært en mild vinter hvor det sjelden har vært lengre perioder med minusgrader over tid. Temperaturen gjennom et døgn har variert mye med minusgrader om natten og flere plussgrader på dagtid. Siden det både ved bruk varmekamera og termoelement bør være en temperaturforskjell på minst 10 °C mellom inne- og utetemperatur, har det vært utfordrende å finn en passende tid å gjennomføre feltarbeidet. Den milde vinteren og den store variasjonen på temperatur gjennom flere døgn kan ha gjort målingene vanskeligere å tolke i forhold til kuldebroeffekt.

Temperaturloggerne ute på Campus Ås og Sørhellinga var henholdsvis montert til den faste solavskjermingen til vinduet og til en utvendig rømningstrapp. Plasseringen av

temperaturloggerne ute gjør at de er noe skjermet for vær og vindu. Lufttemperaturene vil kanskje ikke være like representative for hva den utvendige lufttemperaturen er på grunn av denne skjermingen.

Nøyaktighet på måleutstyr vil påvirke kvaliteten på måleresultatet. De er presentert i kapittel 3.1.1.

Måleapparatet i seg selv og bruken av termoelementene er en annen feilkilde som kan ha påvirket måleresultatet. Termoelementene eller sensorene er belagt med en myk plast, og det gjør at det oppstår et ekstra sjikt mellom termoelementet og ønsket målt overflate.

Temperaturen som måles blir derfor en temperatur mellom overflatetemperaturen til materialet og lufttemperaturen. I tillegg ble det brukt en tynn dobbeltsidig tape til å feste termoelementene til konstruksjonene etter anbefaling fra produsenten av TRSYS01. Det er vanskelig å si hvor mye disse sjiktene vil påvirke den målte overflatetemperaturen i forhold til hva den reelle overflatetemperaturen på materialet er.

Det vil være usikkert knyttet til forstyrrelser under målingene ettersom målingene ikke ble overvåket. På Campus Ås ble målingene gjennomført mens det fortsatt var en byggeplass. Målingene ble utført over en helg, men byggeplassen var også åpen på lørdagen. Av den grunn kan målingene ha blitt forstyrret av arbeidere som jobbet lørdag.

På Sørhellinga ble målingene utført i et undervisningsrom over en uke. Vinduet som det ble utført målinger på ble åpnet under målingen. Det var satt opp tydelig sperring og beskjed om å ikke gjøre dette. Vinduet ble lukket så fort dette ble kjent. Da målingen skulle hentes inn, hadde termoelementsensorene på innvendig overflate begynt å løsne. Hvorfor de hadde begynt å løsne, kan komme av at vinduet ble åpnet under målingen. Noen kan ha rørt og forstyrret målingen, eller at tapen var for dårlig til å holde en uke. Figur 20 på neste side viser hvordan termoelementene på innvendige overflater nesten hadde løsnet.



Figur 20 Innvendig termoelementer har nesten løsnet på henholdsvis bunn- og sidefasadeelement på Sørhellinga.

Nabovinduet til det målte vinduet på begge byggene sto delvis på gløtt under målingene. Ledningene til de utvendige termoelementene var ført gjennom vinduet. For å tette nabovinduet mest mulig, var det tapet rundt vinduskarmen. Glippen til vinduet førte nok likevel til et ekstra varmetap gjennom nabovinduet.

Det krever mye trening for å termograferer og kunne fastslå alle potensielle feilkilder som kan ha påvirket termogrammene. Det ble tapet et område på vindusruten ved termografering, men aluminiumsprofilen burde også vært tapet. Aluminium reflekterer mye varmestråling. Derfor vil overflatetemperaturene på aluminiumsprofilene også være misvisende på samme måte som glassruten. Det hadde vært en fordel og brukt en svart elektrotape med en kjent emissivitet ($\epsilon = 0,95$), istedenfor tapen og papirlappen som ble brukt.

3.2 Modelling

Modelling i et dataprogram ved numerisk beregning er den mest presise og effektive måten å beregne kuldebroer på. Det er utført varmestrømsberegninger på prosjektene Campus Ås og Sørhellinga. Målet med varmestrømsberegningene ved modellering er å skaffe data, slik at det er mulig å vurdere kuldebroeffekten kvantitativt ved ulike vindusinnsetninger. I tillegg er det interessant å se i hvor stor grad ulike tiltak vil endre kuldebroverdien.

3.2.1 WinIso2D

Til å gjennomføre varmestrømsberegningene ble simuleringsprogrammet WinIso2D Professional versjon 7.74 brukt. Det er et todimensjonalt program til å beregne ulike termiske egenskaper i konstruksjoner som for eksempel varme- og fuktighetsstrømmer, isotermer, U-verdier og kuldebroverdier (Sommer-Informatik, 2019). Beregningen i programmet utføres i henhold til EN ISO 10077-2:2017. Programmet er beregnet på å gjøre varmestrømsberegninger i vindu- og fasadekonstruksjoner, men det er også mulig å gjøre varmestrømsberegninger på andre typer bygningskonstruksjoner. WinIso2D er utviklet av Sommer Informatik GmbH i Tyskland.

Modelleringen ble utført todimensjonalt for vindusinnsettingen ved bunnkarm. Under følger fremgangsmåten for hvordan modelleringen ble gjennomført.

3.2.2 Fremgangsmåte

Her følger fremgangsmåten som ble brukt for å finne kuldebroverdier ved vindusinnsetninger med numerisk beregning i WinIso2D.

1. Vertikalt konstruksjonssnitt for vindusinnsetting, vegg og vindu tegnes i programmet AutoCAD. Dette er detaljerte tegninger som viser oppbygningen av vindusinnsetting, vegg og vindusprofil. Tilslutt «boksene» tegningene inn med en linje i avstand 3 cm på hver side fra ytterkant av konstruksjon. Området skal brukes til å angi grensebetingelser i WinIso2D.
2. DXF-filen over konstruksjonsdetaljene fra AutoCAD konverteres til enklere tegninger satt sammen av rette linjer ved hjelp av WinIso2D DXF-Converter.

3. Tegningene blir lastet opp i WinIso2D Edit og modellene fylles med spesifikke materialer.
4. Modellene ferdigstilles ved å angi grensebetingelser og deretter beregnes varmestrømmen gjennom konstruksjonene.
5. Videre beregnes lineære varmekoplingskoeffisienten L^{2D} for hver av konstruksjonssnittene ved å multiplisere beregnet gjennomsnittlig U-verdi for konstruksjonssnitt med lengden til konstruksjonssnittet.
6. Kuldebroverdien beregnes ved å ta differansen mellom den lineære varmekoplingskoeffisienten L_1^{2D} til vindusinnsettingen og varmekoplingskoeffisienten L_2^{2D} og L_3^{2D} til de tilstøtende konstruksjonene.

(SINTEF Byggforsk, 2008)

Beregning av lineær kuldebroverdi gjøres etter formel (8). Det er den samme formelen som (4), bare omskrevet for beregning av kuldebroverdi ved vindusinnsetting.

$$\Psi_k = L_1^{2D} - L_2^{2D} - L_3^{2D} \text{ [W/(mK)]} \quad (8)$$

Hvor:

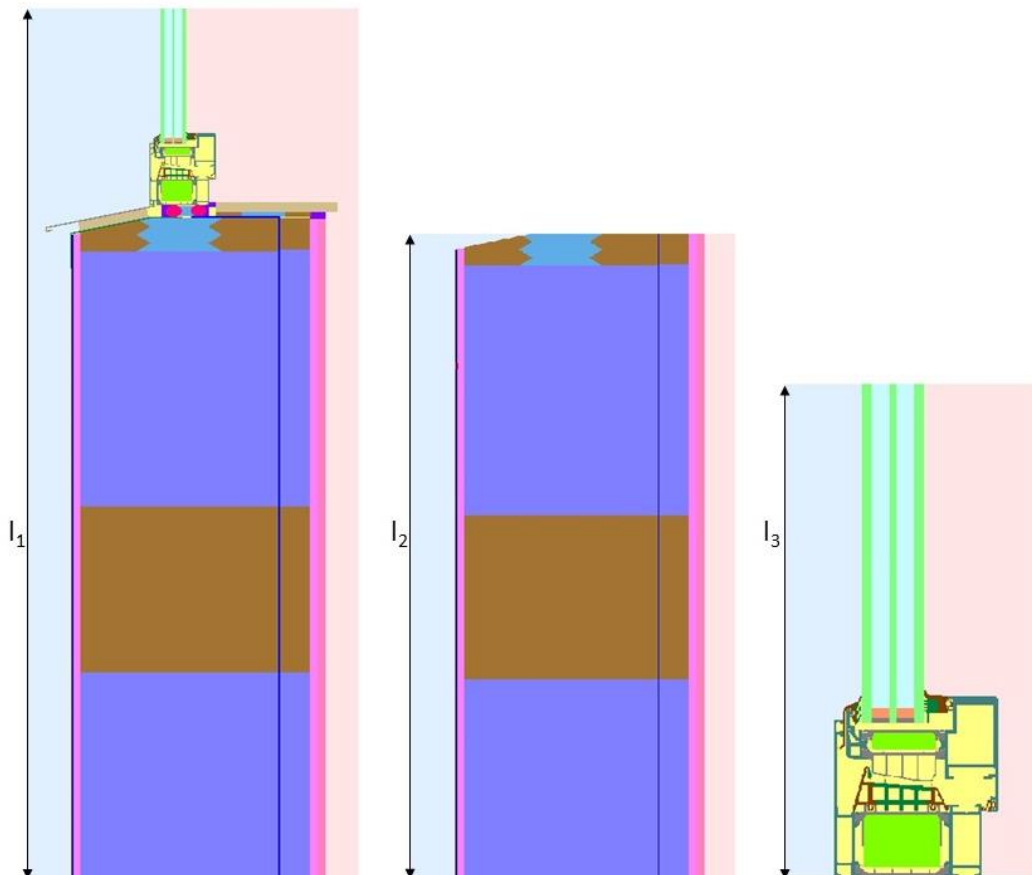
L_1^{2D} : todimensjonal lineær varmekoplingskoeffisient for vindusinnsetting [W/(mK)].

L_2^{2D} : todimensjonal lineær varmekoplingskoeffisient for vegg [W/(mK)].

L_3^{2D} : todimensjonal lineær varmekoplingskoeffisient for vindu [W/(mK)].

Beregningen av $L_i^{2D} = U_i * l_i$.

Figur 21 illustrerer lengder som er inkludert i beregningen av kuldebroverdi.



Figur 21 Eksempelskisse over deler som er med i beregning av kuldebro ved vindusinnsetting ved modellering. Lengde l_1 er lengde til modellert vindusinnsetting inkludert vegg, vindu og monteringsfuge. Lengde l_2 er lengde til modellert vegg og l_3 er lengde til modellert vindu (Figuren er ikke i skala.).

Denne prosedyren ble fulgt for utregning av kuldebroverdi ved ulike vindusinnsettinger, etter tiltak ved innside etterisolering av vegg og ramme- og karmprofil, samt ved endring av grensebetingelser fra standard grensebetingelser med temperaturdifferanse på 20 K til målte temperaturer. Grunnen for at etterisoleringen ble gjort på innside og ikke utside av konstruksjon, kommer av at det var enklere å utføre i modelleringen uten at det måtte utføres for store endringer. I tillegg ble etterisoleringene bare utført ved å legge til isolasjon i modellen uten at det ble tilrettelagt for hvordan det ville blitt gjort i praksis med å flytte eller legge til innvendig kledning, foring osv. Det antas at ved kun å legge til isolasjon gir et godt nok inntrykk av hvordan kuldebroverdien vil endres ved tiltakene med innvendig etterisolering av vegg og ramme- og karmprofil. Grunnet at isolasjon er et materiale med svært varmeisolerende effekt sammenliknet med andre materialer.

I de neste delkapitlene kommer en nærmere beskrivelse av hvordan modelleringen ble utført på Campus Ås og Sørhellinga og hvilke forutsetninger som ble gjort på hvert enkelt prosjekt.

3.2.3 Forutsetninger

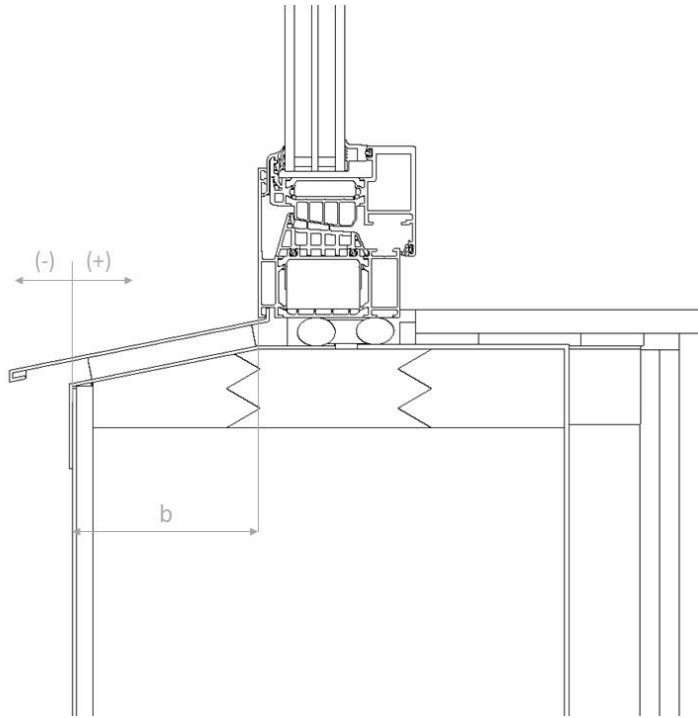
Det ble gjort ulike forutsetninger og forenklinger ved modellering i WinIso2D.

Varmestrømsberegningene kunne derfor gjennomføres på en god måte uten at det skulle gå for mye utover resultatet av simuleringene. Målet var hele tiden å gjenskape vindusinnsettingen på Campus Ås og Sørhellinga i modell etter beste evne.

Modellene fra begge byggene ble forenklet ved å se bort fra den ventilerte kledningen. Den ble modellert med en varmeovergangsmotstand på 0,04 (m²K)/W ifølge standard. Hvis utvendig kledning hadde vært modellert skulle utvendig overgangsmotstanden på 0,13 (m²K)/W vært benyttet (Byggdetlajer 471.008, 2018). I tillegg ble fast solavskjerming og innfestninger knyttet til solavskjerming sett bort i fra.

Materialer som ble brukt ved modellering ble først og fremst innhentet som informasjon fra de ulike prosjektene, samt Schüco sin database. I tillegg ble Byggdetaljer 471.010 over varmekonduktivitet til bygningsmaterialer brukt når informasjon om materialer ikke ble oppdrevet.

Det ble modellert tre ulike vindusinnsettinger for prosjekt Campus Ås og Sørhellinga. En midtstilt, helt inntrukket og helt uttrukket plassering i vegglivet. En av vindusinnsettingene var reell og de to andre fiktive. Figur 23 i delkapittelet om Campus Ås viser de ulike vindusinnsettingene for Campus Ås. Figur 24 i delkapittelet om Sørhellinga viser de modellerte vindusinnsettingene for Sørhellinga. Figur 22 illustrerer avstanden b for ulike vindusinnsettinger. Avstanden b forteller hvor langt inn eller ut vinduene er plassert i vegglivet. Avstanden måles fra utside vindsperre til utvendig kant av vinduskarm.

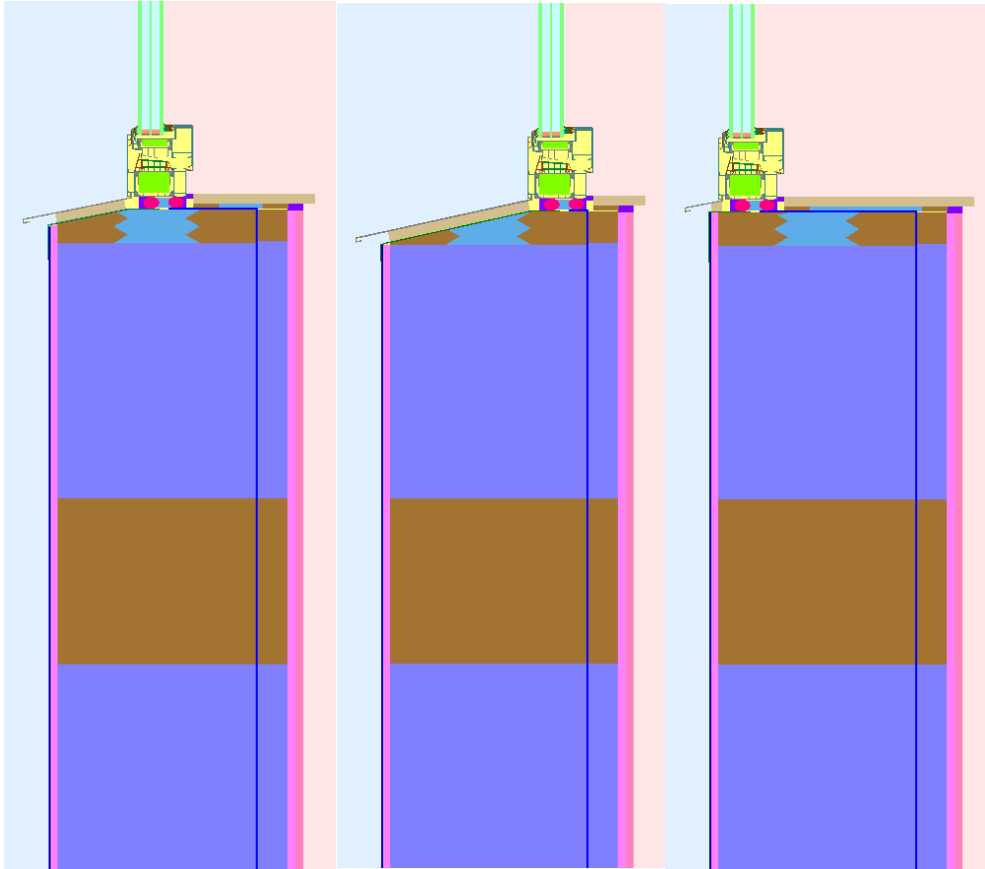


Figur 22 Avstanden b for ulike vindusinnsetninger er avstanden fra utside vindsperre til utvendig kant av vinduskarm [mm].

I de neste delkapitlene er en nærmere beskrivelse av hvilke forutsetninger som ble gjort ved valg av materiale og konstruksjon på henholdsvis Campus Ås og Sørhellinga.

Campus Ås

Figur 23 viser modellert vindusinnsettinger av henholdsvis midtsstilt (reell), inntrukket og uttrukket vindusinnsetting på Campus Ås.



Figur 23 Modellert vindusinnsetting med henholdsvis midtsstilt (reell), inntrukket og uttrukket vindusinnsetting på Campus Ås. Det er lagt inn et felt med tre i veggkonstruksjonene for å få treandelen til 26 %. Fargene står for ulike materialer. I Vedlegg D er en beskrivelse av materialene.

Materialer som ble brukt ved modellering ble innhentet som informasjon fra byggherre, entreprenør og arkitekt på prosjektet. Det ble likevel tatt noen antakelser på materiale ettersom noe informasjon fra tredjeparter ikke var mulig å oppdrive. I Vedlegg D er en oversikt over alle anvendte materialer med tilhørende varmekonduktivitet og simulerte varmestrømsberegninger.

Veggkonstruksjonene på Campus Ås er satt sammen av Iso3-vegger fra Moelven. I henhold til produktdatablad fra dem skal større næringsbygg beregnes med 26 % bindingsverksandel i U-verdien for vegg (Moelven, 2016). Av den grunn ble det lagt inn en treandel på til sammen 26 % i veggkonstruksjonene for å få mere realistiske varmestrømsberegninger. U-verdien på vegg fra produsenten er angitt til å være $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ved 26 % bindingsverksandel.

Det var innvendig beslag rundt foring på vindusinnsettingen på Campus Ås, men den ble ikke tatt med i modelleringen.

Vinduet på Campus Ås består av trelags glass og aluminiumsprofiler fra Schüco.

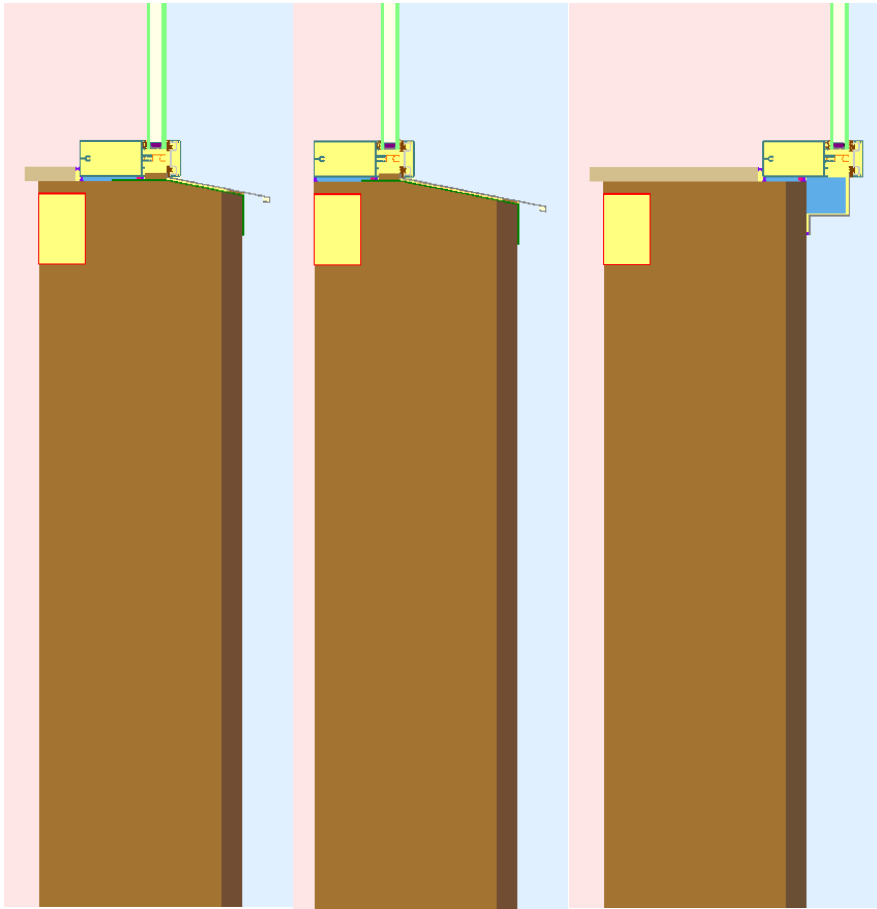
Aluminiumsprofilene til vinduene ble fylt med materiale etter informasjon fra Schüco om deres produkter. Informasjon av hva vindusruten besto av var ikke mulig å få tak i. Etter samtale med Schüco ble det antatt at trelagsruten var av god kvalitet og har en U-verdi på 0,6 W/(m²K). Avstandsprofilene mellom glassene ble også antatt å være av det beste på markedet, levert fra Swisspacer. Avstandsprofilene ble geometrisk forenklet i modellen etter anbefaling fra produsenten. U-verdien til vinduet fra vindusprodusenten er oppgitt til å være 0,79 W/(m²K) (Venta Windows, 2017).

Etterisolering av innside vegg med 10 cm isolasjon på prosjekt Campus Ås er illustrert i Figur 41 i Vedlegg B.

Etterisolering av innside vindusprofil på Campus Ås ble gjort på vinduskarm over foring. Det ble gjort siden vinduet er åpningsbart. Ved å etterisolere rammen, det vil si helt inn til glasset, ville ikke vinduet vært mulig å åpne. Figur 42 i Vedlegg B viser hvordan etterisoleringen av innside karm ble løst.

Sørhellinga

Figur 24 viser modellert vindusinnsettinger fra prosjekt Sørhellinga med henholdsvis midtstilt, inntrukket og uttrukket (reell) vindusinnsetting.



Figur 24 Modellert vindusinnsetting med henholdsvis midtstilt, inntrukket og uttrukket (reell) vindusinnsetting på Sørhellinga. Fargene står for ulike materialer. I Vedlegg D er en beskrivelse av materialene.

Materialer som ble brukt ved modellering ble først og fremst hentet fra Byggdetaljer 471.010. Siden prosjektet er eldre, var det vanskeligere å innhente informasjon over bygget. I Vedlegg D er en oversikt over alle anvendte materialer med tilhørende varmekonduktivitet og simulerte varmestrømsberegninger.

Veggkonstruksjonen på Sørhellinga er av massivtre.

Vinduene på Sørhellinga består av fasadeelement og regnes som en glassfasade. De består av tolags glass med aluminiumsprofiler fra Schüco. Aluminiumsprofilene til vinduene ble fylt med materiale etter informasjon fra Schüco. Informasjon av hva vindusruten består av var ikke mulig å oppdrive. Etter samtale med Schüco ble det antatt at tolagsruten har en U-verdi på $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Avstandsprofilen mellom glassene ble modellert etter et eksempel fra Schüco på typisk avstandsprofil i aluminium.

Modelleringen av vindusinnsettingen på Sørhellinga ble gjort av vinduet/glassfasaden ved siden av det åpningsbare vinduet som feltarbeidet ble utført på. Det ble gjort på bakgrunn av at det var problemer med å oppdrive vindusdetaljen med det åpningsbare vinduet. Denne forskjellen i konstruksjon mellom feltarbeid og modellering vil utgjøre en feilkilde ved sammenlikning av resultater. Det antas at det likevel vil være mulig å sammenlikne feltarbeidet og modellering av Sørhellinga siden mesteparten av vindusinnsettingene er like.

Etterisolering av innside vegg med 10 cm isolasjon på prosjekt Sørhellinga er illustrert i Figur 43 i Vedlegg B.

Etterisoleringen av innside fasadeelement på Sørhellinga ble gjort over det gjenværende arealet på innsiden av fasadeelementet over foring. Figur 44 i Vedlegg B viser hvordan etterisoleringen av innside fasadelement ble løst.

3.2.4 Beregningsforutsetninger

I dette kapitlet blir forutsetninger for varmestrømsberegningene angitt. Beregningen tar kun hensyn til geometri, varmeovergangsmotstand, temperatur i grensebetingelsene og varmeledningsevne til materialer. Det vil si at konveksjon eller stråling ikke direkte er tatt med i beregningene, men er tatt med som erfaringsverdier i varmeovergangsmotstand og i varmekonduktivitet for hulrom luft.

Avgrensinger av konstruksjon

Alle beregnede konstruksjoner hadde konstante mål under simuleringene. Avgrensningen av vinduskonstruksjon ble gjort i henhold til NS-EN ISO 10077-2:2017, mens avgrensning av veggkonstruksjon ble gjort i henhold til NS-EN ISO 10211:2017. I standardene står det at vinduskonstruksjonen skal ha en lengde på ruten på minst 19 cm og at veggkonstruksjonen skal ha en lengde på tre ganger tykkelsen av veggen eller minst 100 cm. Det ble valg å bruke en vegg lengde på 100 cm for enklere sammenlikning mellom testbyggene. Den totale modulerte vindusinnsettingen er summen av lengdene til de tilstøtende konstruksjonene, pluss monteringsfugen mellom vinduet og veggen.

Varmeovergangsmotstander

Det ble brukt overgangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946:2017. Da beregningene er gjort over vertikale snitt, ble varmeovergangsmotstand for horisontal varmestrøm benyttet.

Varmeovergangsmotstandene tar hensyn til konveksjon og stråling. Tabell 8 viser varmeovergangsmotstander for ulike varmestrømsretninger.

Tabell 8 Varmeovergangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946:2017.

Varmeovergangsmotstand [(m ² K)/W]	Varmestrømsretning		
	Oppover	Horisontalt	Nedover
R _{si} (Innvendig)	0,10	0,13	0,17
R _{se} (Utvendig)	0,04	0,04	0,04

Temperaturer

Det er brukt en innvendig og utvendig overflatetemperatur i beregningene i henhold til NS-EN ISO 10077-2:2017, Vedlegg G. Det gir en temperaturdifferanse på 20 K gjennom konstruksjonen. I oppgaven blir en temperaturdifferanse på 20 K i beregning av kuldebroverdier ved simulering omtalt som standard grensebetingelser.

Tabell 9 Temperaturgrensebetingelser i henhold til NS-EN ISO 10077-2:2017

Overflate	Temperatur [K]
Innvendig	20
Utvendig	0

Varmeledningsevne til materialer

Modellen fylles med materialer med spesifikke varmekonduktiviteter. Hulrom i aluminiumsprofil, og resten av konstruksjonen fylles med luft med erfaringsverdi i U-verdi med hensyn til varmeledning, konveksjon og stråling etter EN ISO 10077-2.

Målte grensebetingelser

Grensebetingelsene ble endret fra standard grensebetingelser ved enkelte simuleringer i WinIso2D, fordi en ønsket å validere feltmålinger. Målt data over tid ble midlet og benyttet

som grensebetingelser i beregningene. Fra å regne med en inne temperatur på 20 °C og ute temperatur på 0 °C som tilsvarer en temperaturforskjell på 20 °C/K gjennom konstruksjonen, ble det simulert med målte temperaturer inn og ute som ga temperaturforskjellen gjennom konstruksjonen. Bakgrunnen for disse varmestrømsberegningene var å se sammenhengen mellom målte overflatetemperaturer og simulerte overflatetemperaturer. I tillegg finne ut hva som var de reelle kuldebroverdiene på tidspunktet målingene ble utført.

3.2.5 Feilkilder ved modellering

Det er en forventet usikkerhet eller feilmargin ved numerisk modelleringen. NS-EN ISO 14683:2017 oppgir at dataprogram ofte kan ha en feilmargin på +/- 5 %. WinIso2D har ikke oppgitt noen feilmargin, men det forventes at den er i størrelsesorden opptil 5 %.

Ved todimensjonale beregninger av varmestrøm er det noen forhold som det ikke blir tatt høyde for. Det ene er global konveksjon, og det andre er hengsler og belag. Global konveksjon kan oppstå når luft kommer inn i vindusprofilen. Videre stiger luften oppover i profilen før lufta går ut gjennom toppen av profilen. Luften beveger seg på denne måten siden den varmes opp i profilen samtidig som den kjøler ned vindusrammen og -karmen. Hvis fugene er åpne mot det fri, vil disse forholdene påvirke U-verdien til vinduet og føre til at beregnet U-verdi vil fremstå bedre enn hva den reelle U-verdien til vinduet er (SINTEF Byggforsk, 2009). I vinduer med tre lags glass hvor det er to luftlommer, vil det være lite konveksjon sammenliknet med to lags glass. Det kommer av at forskjellen i temperatur over hvert hulrom blir redusert. Det er temperaturforskjellen på luft, gassen mellom glassene som er drivkraften for konveksjon. Av den grunn vil det være mer konveksjon i vinduene på Sørhellinga enn Campus Ås.

Andre potensielle feilkilder ved varmestrømsberegningene er blant annet forutsetninger og antagelser som ble gjort ved forenkling av modellene og valg av materialer. Det er vanskelig å kunne anslå hvor mye forutsetninger og antakelsene har påvirket resultatet av simuleringene.

Overflatetemperaturer som beregnes ved manuelle metoder eller ved hjelp av dataprogram, kan i noen tilfeller være misvisende, spesielt på innvendige overflater (Byggdetaljer 471.016, 1999). Det kommer av at valgt innvendig varmeovergangsmotstand lett påvirker den innvendige overflatetemperaturen ved beregning. Det er derfor viktig å bruke varmeovergangsmotstander som er godkjente for gitt forhold.

3.3 Behandling av data fra feltarbeid og modellering

Når feltarbeid og modellering er utført, behandles og sammenstilles dataen før resultatet presenteres og analyseres. Behandling og analysering av data fra feltarbeid og modellering, skal se om problemstillingen i oppgaven kan besvares. Kan numerisk beregning av kuldebro verifiseres med temperaturmålinger? Hvordan påvirker plassering av vindu i vegglivet kuldebroeffekten i bygg med vinduer med ramme- og karmprofil i aluminium? Hvordan vil innvendig etterisolering av vegg og ramme- og karmprofil påvirke kuldebro ved vindusinnsetting? Kan det designes en standard plassering av vindu i vegglivet for et optimalt energieffektivt bygg?

Behandling av dataen fra både feltarbeid og modellering ble gjort i Microsoft Office Excel. Dataene fra feltarbeidet ble sammenstilt og illustrert grafisk ved bruk av Excel. Videre ble gjennomsnittstemperaturer beregnet og varmetap fra kuldebroene estimert. Tilslutt ble resultatet presentert og analysert. Simulerte varmestrømsberegninger over U-verdier fra ulike konstruksjonssnitt fra WinIso2D ble sammenstilt i Excel. Lineær kuldebroverdi ble beregnet ut fra U-verdier og lengder. De ulike kuldebroverdiene ble videre presentert og analysert opp mot hverandre.

4 RESULTATER

I dette kapittelet er resultater fra feltarbeidet og modelleringene presentert for henholdsvis prosjekt Campus Ås og Sørhellinga.

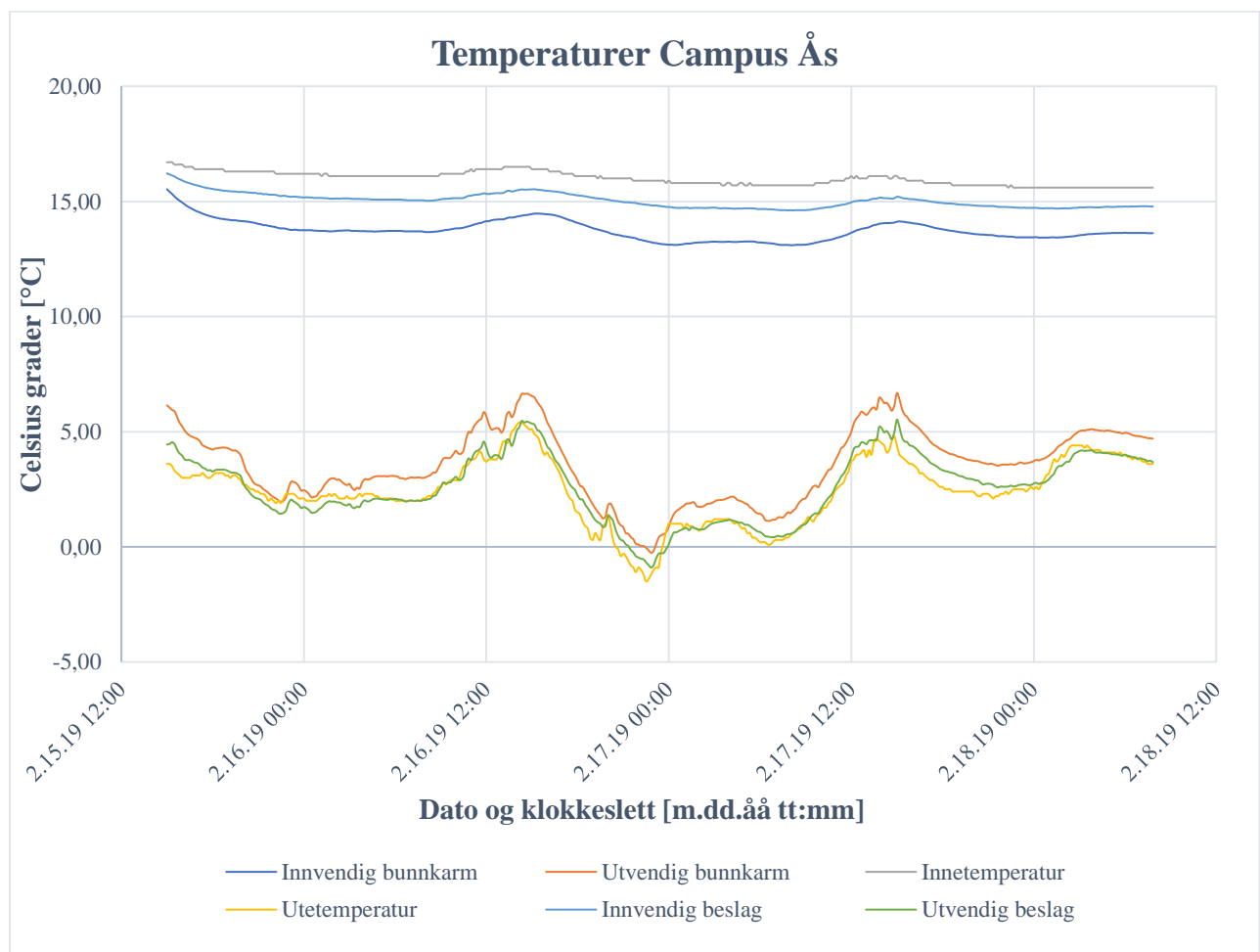
4.1 Campus Ås

Resultat fra prosjekt Campus Ås av målte temperaturer, termografering og modellresultat er presentert i underkapitlene.

4.1.1 Målt temperatur

I dette kapittelet følger resultat fra temperaturmålingene på Campus Ås.

Grafene i Figur 25 viser målte temperaturer på Campus Ås.



Figur 25 Grafer over målte temperaturer fra feltarbeidet for to døgn på Campus Ås. Måleutstyret bestående av temperaturloggere og termoelementer logget temperaturer hvert tiende minutt. Den grå grafen viser lufttemperaturen inne, mens den gule grafen viser lufttemperaturen ute. Den lyseblå kurven viser innvendig overflatetemperatur på beslaget som ligger utenpå bunnforingen i vinduskarmen. Overflatetemperaturene på utvendig beslag er fremstilt med den grønne grafen. Den mørkeblå grafen illustrere overflatetemperaturene på innvendig bunnkarm, mens den utvendig bunnkarm er vist ved den oransje grafen.

Figur 16 i metodekapittelet viser plassering av målepunktene på Campus Ås.

I Tabell 10 vises beregnede gjennomsnittstemperaturer basert på dataene i Figur 25 på Campus Ås.

Tabell 10 Gjennomsnittstemperaturer basert på data fra to døgn for ulike plasseringer av temperatursensorer på Campus Ås.

Plassering	Gjennomsnittstemperatur mellom kl. 15:00 15.-17.02.19 kl. 15:00 [°C]
Inne	16,1
Ute	2,2
Innvendig bunnkarm	13,8
Utvendig bunnkarm	3,2
Innvendig beslag	15,1
Utvendig beslag	2,3

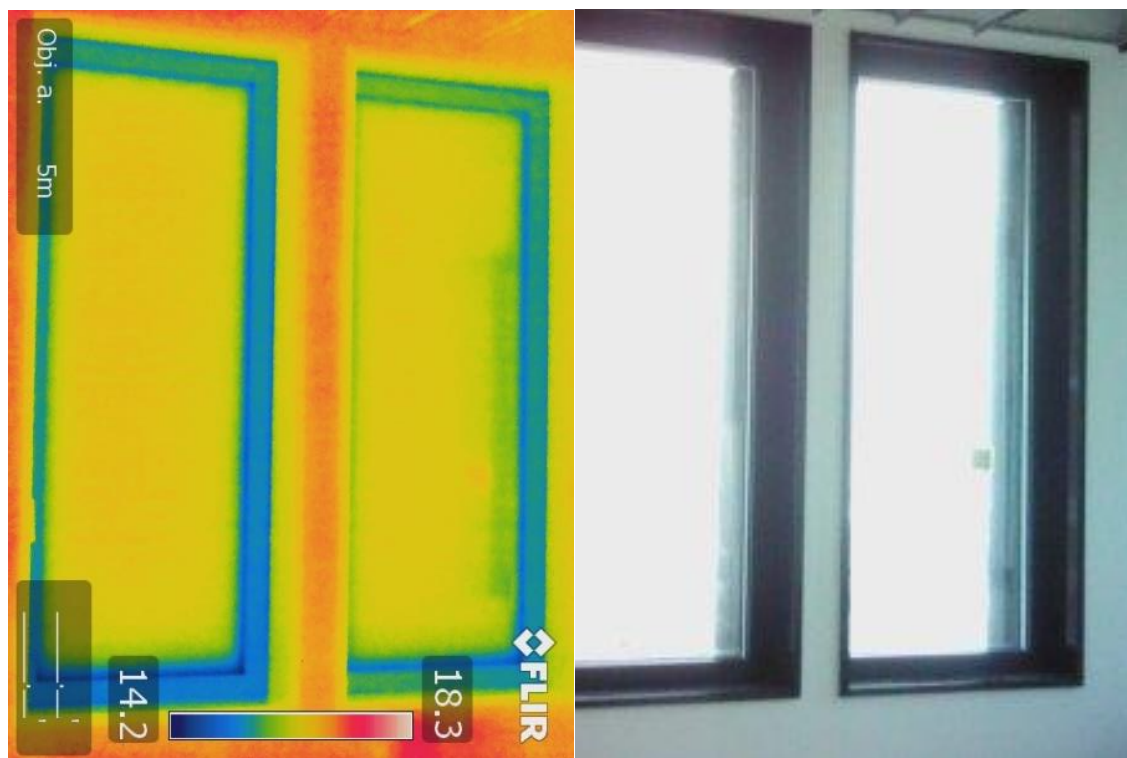
Tabell 11 viser beregnet estimert varmetap og kuldebroverdier fra kuldebro ved vindusinnsetting på Campus Ås etter formel (6) og (7).

Tabell 11 Estimert varmetap og kuldebroverdier gjennom monteringsfuge på Campus Ås. Beregnet ut fra målt overflatetemperatur på innvendig bunnkarm og innvendig beslag.

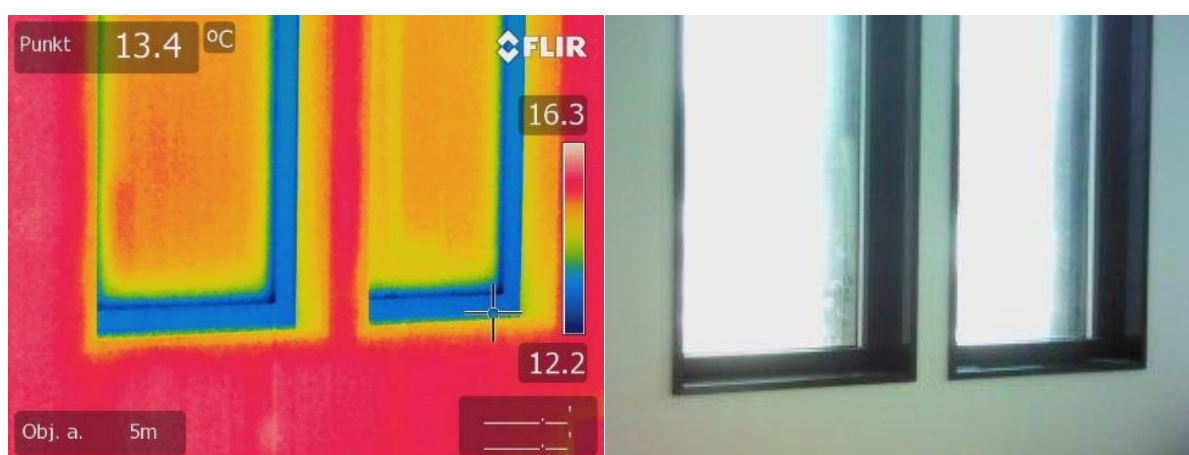
Overflate	Estimert varmetap f_s [W/m ²]	Estimert kuldebroverdi Ψ_m [W/(mK)]
Innvendig bunnkarm	17,857	0,026
Innvendig beslag	7,604	0,011

4.1.2 Termografering

I kapittelet vises to termogram med tilhørende fotografier som ble tatt under feltarbeidet på Campus Ås.



Figur 26 Termogram og fotografi av vinduene som ble brukt under måling tatt 15.02.19 på Campus Ås. En ser at det er kuldebro ved vindusinnsetting ved at overflatetemperaturen er betydelig kaldere rundt vinduene enn resten av vegg.

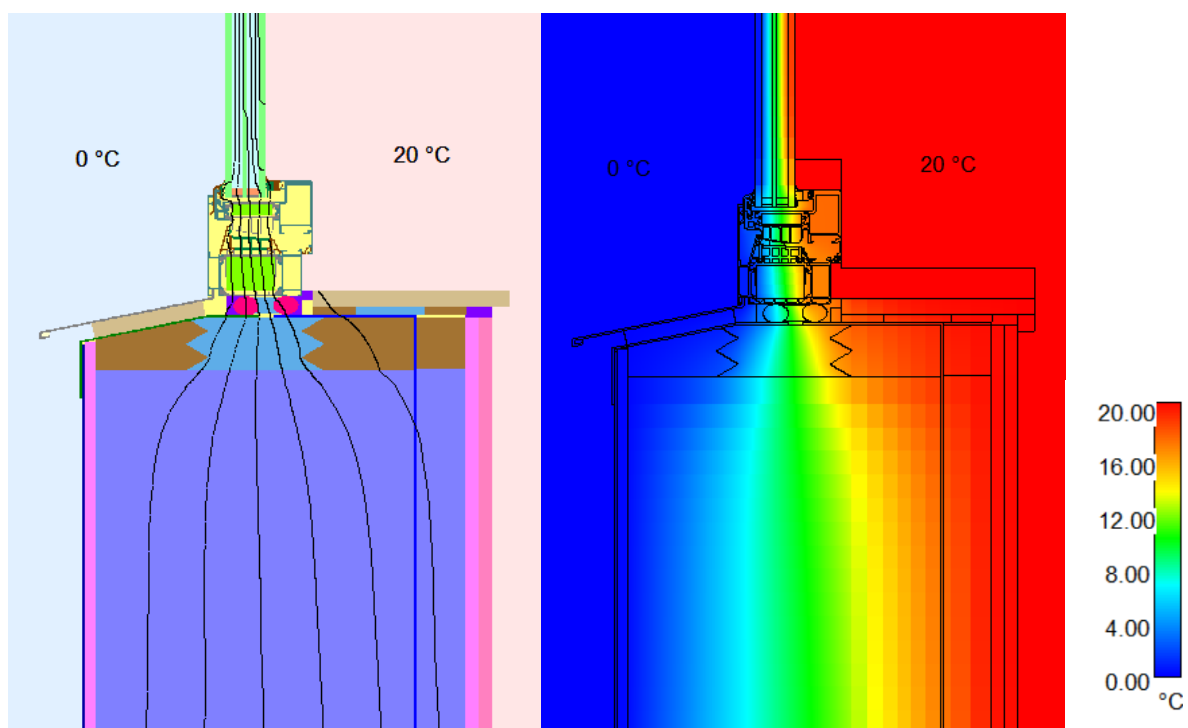


Figur 27 Termogram og fotografi av vinduene som ble brukt under måling tatt 21.02.19 på Campus Ås. Temperaturen på punktet ved bunnkarmen er målt til å være 13,4 °C.

I Vedlegg A ligger flere termogrammer med tilhørende fotografier fra Campus Ås.

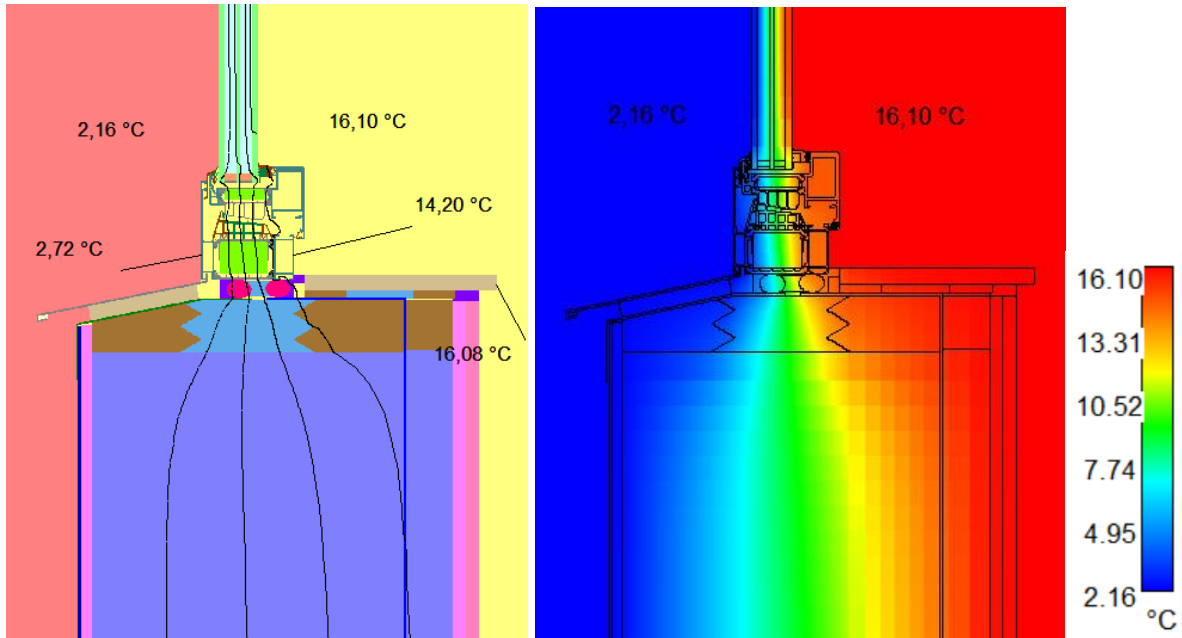
4.1.3 Modellresultat

Figur 28 er to presentasjoner fra modell av (reell) midtstilt vindusinnsetting av dagens konstruksjon på Campus Ås.



Figur 28 To presentasjoner av (reell) midtstilt vindusinnsetting av dagens konstruksjon på Campus Ås. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.

Figur 29 er to presentasjoner fra modell av (reell) midtstilt vindusinnsetting av dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Campus Ås.



Figur 29 To presentasjoner av (reell) midtstilt vindusinnsetting av dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Campus Ås. Den venstre delen av figuren viser materialer, isotermer med svarte streker og overflatetemperaturer hvor termoelementene under feltarbeidet var montert. Den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.

I Tabell 12 er beregnede kuldebroverdier fra modelleringen i WinIso2D og beregninger gjort i Excel. Fullstendige resultater av U-verdier, varmekoplingskoeffisienter, lengder fra simuleringene og anvendte materialegenskaper ligger vedlagt i Vedlegg C og D.

Tabell 12 Beregnede kuldebroverdier fra ulike vindusinnsettinger og tiltak på Campus Ås.

Plassering		Kuldebroverdier [W/(mK)]			
Plassering vindusinnsetting	Avstand fra utside vindsperre b [mm]	Dagens konstruksjon	Etterisolering innside vegg 10 cm	Etterisolering innside karm	Målte grensebetingelser
Midtstilt – reell	118	0,016	0,018	0,013	0,005
Inntrukket	223	0,038	0,032	0,038	0,028
Uttrukket	13	0,037	0,044	0,026	0,029

Tabell 13 er en oversikt over differansen mellom beregnede kuldebroverdier i Tabell 12 og (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Campus Ås.

Tabell 13 Differansen mellom beregnede kuldebroverdier i Tabell 12 og (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Campus Ås.

Plassering		Differanse kuldebroverdier [W/(mK)]			
Plassering vindusinnsetting	Avstand fra utside vindspærre b [mm]	Dagens konstruksjon	Etterisolering innside vegg 10 cm	Etterisolering innside karm	Målte grensebetingelser
Midtstilt – reell	118	0,000	0,002	-0,003	-0,011
Inntrukket	223	0,022	0,016	0,022	0,012
Uttrukket	13	0,021	0,028	0,010	0,013

Tabell 14 er en oversikt over prosentvis endring i kuldebroverdier i Tabell 12, sammenliknet med (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Campus Ås.

Tabell 14 Prosentvis endring i kuldebroverdier i Tabell 12, sammenliknet med (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Campus Ås.

Plassering		Prosentvis endring kuldebroverdier [%]			
Plassering vindusinnsetting	Avstand fra utside vindspærre b [mm]	Dagens konstruksjon	Etterisolering innside vegg 10 cm	Etterisolering innside karm	Målte grensebetingelser
Midtstilt – reell	118	0	12	-21	-66
Inntrukket	223	141	102	136	75
Uttrukket	13	132	177	62	83

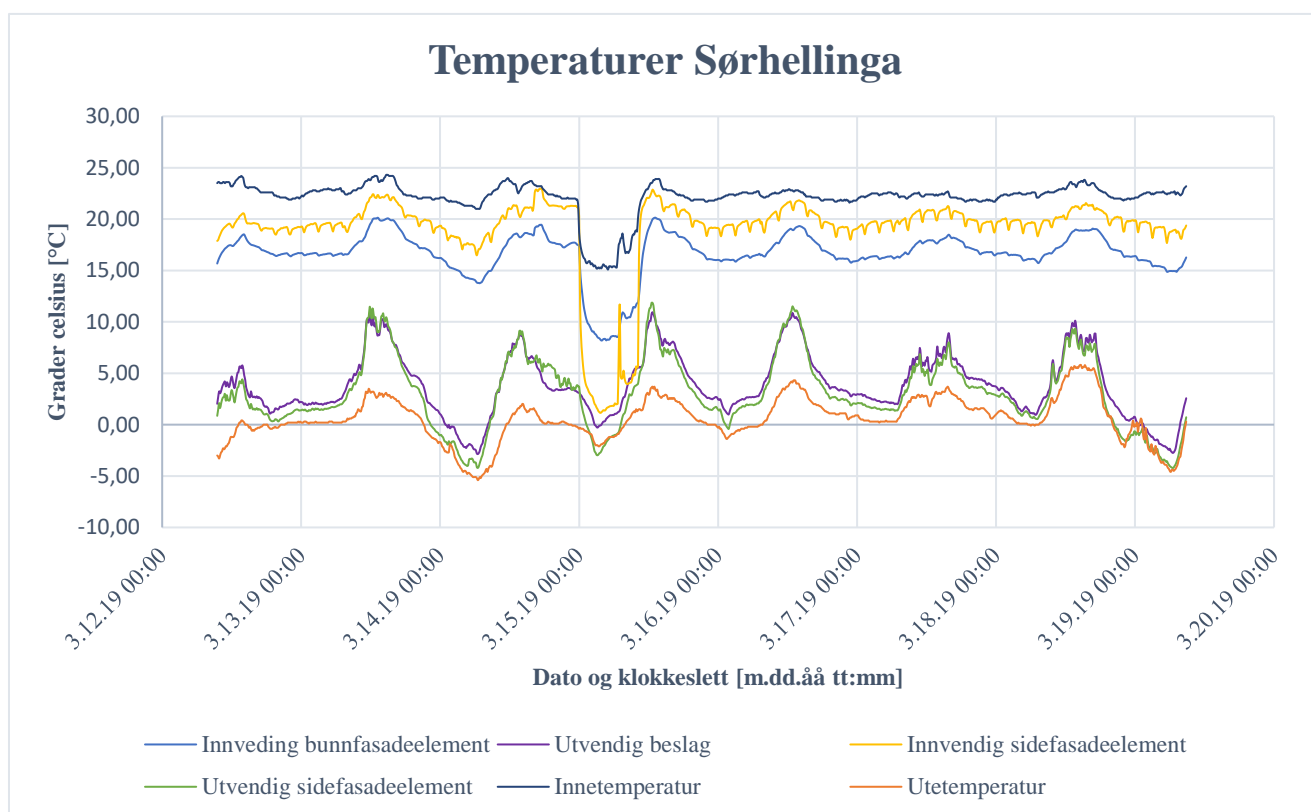
4.2 Sørhellinga

Resultat fra prosjekt Sørhellinga av målte temperaturer, termografering og modellresultat er presentert i underkapitlene.

4.2.1 Målt temperatur

I dette kapittelet følger resultat fra temperaturmålingene på Sørhellinga.

Grafene i Figur 30 viser målte temperaturer på Sørhellinga.



Figur 30 Grafer over målte temperaturer fra feltarbeidet for ca. en uke på Sørhellinga. Måleutstyret bestående av temperaturloggere og termoelementer logget temperaturer hvert tiende minutt. Den mørkeblå grafen viser lufttemperaturen inne, mens den oransje grafen viser lufttemperaturen ute. Den gule kurven viser innvendig overflatetemperatur på sidefasadeelementet. Overflatetemperaturene på utvendig sidefasadeelement er fremstilt med den grønne grafen. Den lyseblå grafen illustrere overflatetemperaturene på innvendig bunnfasadeelement, mens temperaturen på utvendig beslag er vist ved den lilla grafen.

Figur 19 i metodekapittelet viser plassering av målepunktene på Sørhellinga.

I Tabell 15 vises beregnede gjennomsnittstemperaturer basert på dataene i Figur 30 på Sørhellinga.

Tabell 15 Gjennomsnittstemperaturer basert på data fra tre døgn (etter at vinduet ble åpnet) for ulike plasseringer av temperatursensorer på Sørhellinga.

Plassering	Gjennomsnittstemperatur mellom kl. 00:00 16.-19.03.19 kl. 00:00 [°C]
Inne	22,4
Ute	1,6
Innvendig bunnfasadeelement	17,1
Utvendig beslag	4,5
Innvendig sidefasadeelement	20,0
Utvendig sidefasadeelement	3,7

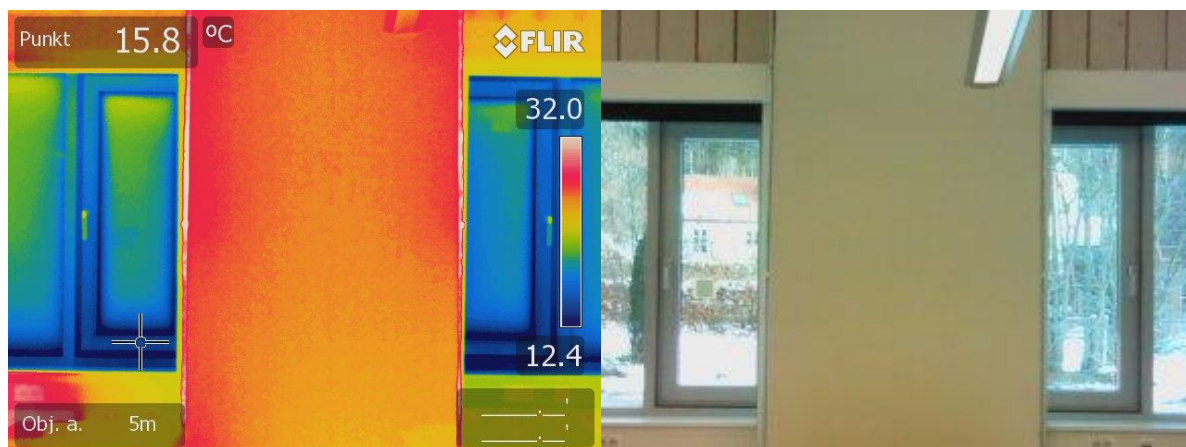
Tabell 16 viser beregnet estimert varmetap og kuldebroverdier ved vindusinnsetting på Sørhellinga etter formel (6) og (7).

Tabell 16 Estimert varmetap og kuldebroverdier gjennom monteringsfuge på Sørhellinga. Beregnet ut fra målt overflatetemperatur på innvendig bunnfasadeelement og innvendig sidefasadeelement.

Overflate	Estimert varmetap f_s [W/m ²]	Estimert kuldebroverdi Ψ_m [W/(mK)]
Innvendig bunnfasadeelement	40,449	0,012
Innvendig sidefasadeelement	18,290	0,005

4.2.2 Termografering

I kapittelet vises to termogram med tilhørende fotografier som ble tatt under feltarbeidet på Sørhellinga.



Figur 31 Termogram og fotografi av vinduene som ble brukt under måling tatt 12.03.19 på Sørhellinga. En ser at det er kuldebro ved vindusinnsetting ved at overflatetemperaturen er betydelig kaldere rundt vinduene enn resten av veggen.

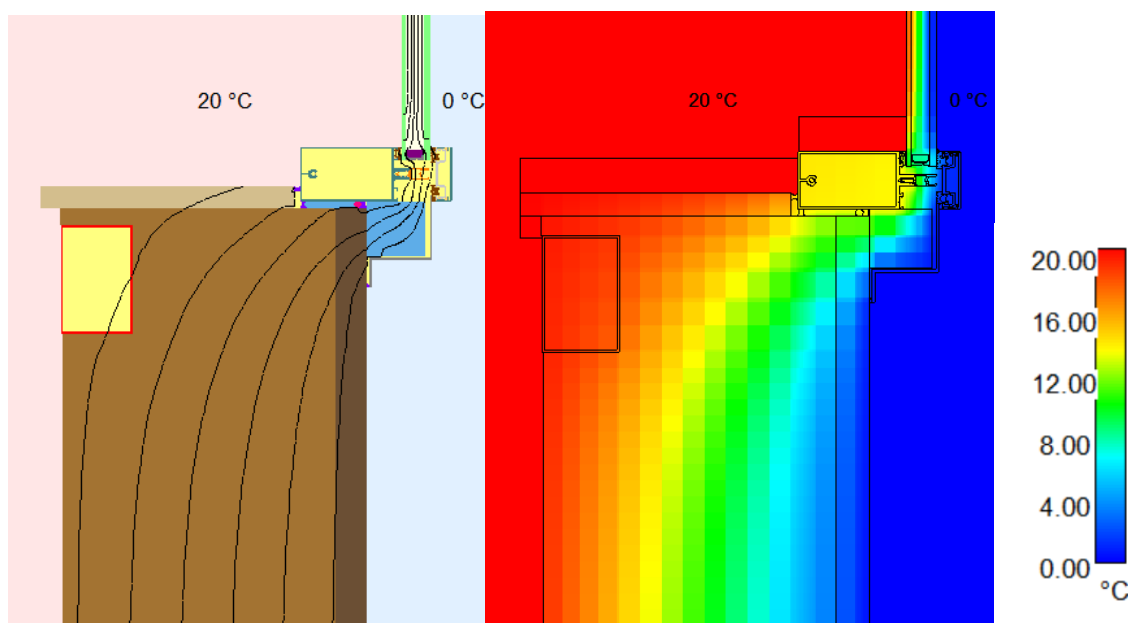


Figur 32 Termogram og fotografi av vinduene som ble brukt under måling tatt 12.03.19 på Sørhellinga. Temperaturen på punktet ved bunnkarmen er målt til å være 15,6 °C.

I Vedlegg A ligger flere termogrammer med tilhørende fotografier fra Sørhellinga.

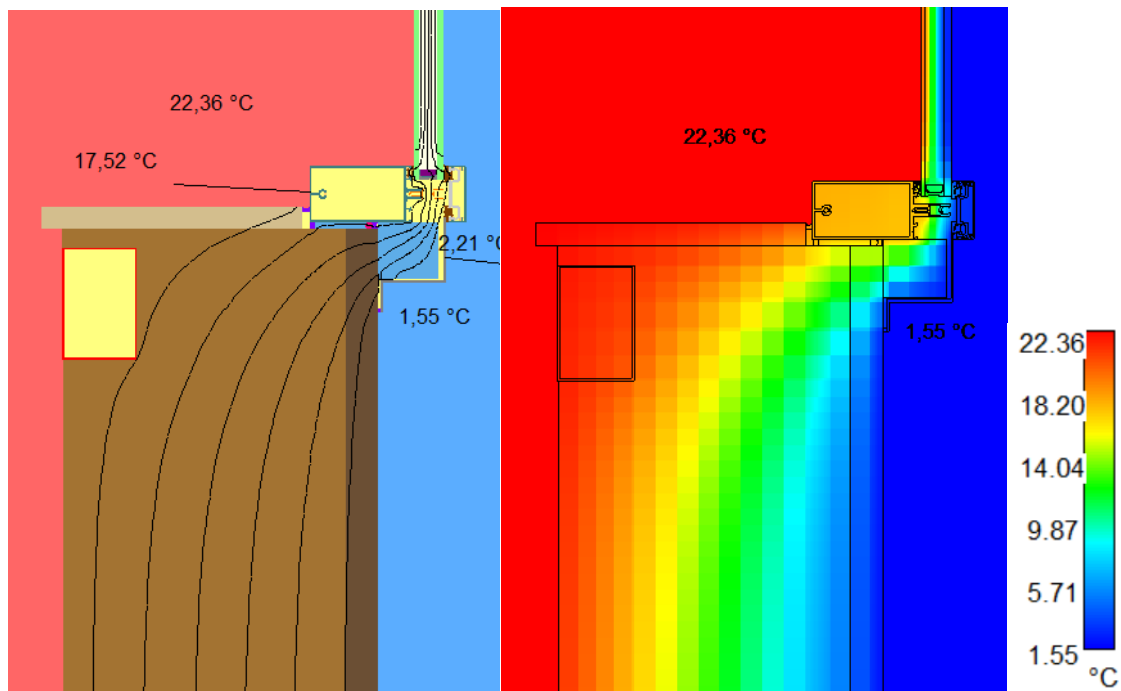
4.2.3 Modellresultat

Figur 34 er to presentasjoner fra modell av (reell) uttrukket vindusinnsetting av dagens konstruksjon på Sørhellinga.



Figur 33 To presentasjoner av (reell) uttrukket vindusinnsetting av dagens konstruksjon på Sørhellinga. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.

Figur 34 er to presentasjoner fra modell av (reell) uttrukket vindusinnsetting av dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Sørhellinga.



Figur 34 To presentasjoner av (reell) uttrukket vindusinnsetting av dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Sørhellinga. Den venstre delen av figuren viser materialer, isotermer med svarte streker og overflatetemperaturer hvor termoelementene under feltarbeidet var montert. Den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.

I Tabell 17 er beregnede kuldebroverdier fra modelleringen i WinIso2D og beregninger gjort i Excel. Fullstendige resultater av U-verdier, varmekoplingskoeffisienter, lengder fra simuleringene og anvendte materialegenskaper ligger vedlagt i Vedlegg C og D.

Tabell 17 Beregnede kuldebroverdier fra ulike vindusinnsettinger og tiltak på Sørhellinga.

Plassering		Kuldebroverdier [W/(mK)]			
Plassering vindusinnsetting	Avstand fra utside vindsperre b [mm]	Dagens konstruksjon	Etterisolering innside vegg 10 cm	Etterisolering innside fasadeelement	Målte grensebetingelser
Midtstilt	84,6	0,023	0,050	0,028	0,034
Inntrukket	141,5	0,054	0,047	0,054	0,054
Uttrukket - reell	-78	0,037	0,092	0,026	0,052

Tabell 18 er en oversikt over differansen mellom beregnede kuldebroverdier i Tabell 17 og (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Sørhellinga.

Tabell 18 Differansen mellom beregnede kuldebroverdier i Tabell 17 og (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Sørhellinga.

Plassering		Differanse kuldebroverdier [W/(mK)]			
Plassering vindusinnsetting	Avstand fra utside vindspærre b [mm]	Dagens konstruksjon	Etterisolering innside vegg 10 cm	Etterisolering innside fasadeelement	Målte grensebetingelser
Midtstilt	84,6	-0,014	0,013	-0,008	-0,002
Inntrukket	141,5	0,017	0,011	0,017	0,018
Uttrukket - reell	-78	0,000	0,056	-0,011	0,015

Tabell 19 er en oversikt over prosentvis endring i kuldebroverdier i Tabell 17, sammenliknet med (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Sørhellinga.

Tabell 19 Prosentvis endring i kuldebroverdier i Tabell 17, sammenliknet med (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Sørhellinga.

Plassering		Prosentvis endring kuldebroverdier [%]			
Plassering vindusinnsetting	Avstand fra utside vindspærre b [mm]	Dagens konstruksjon	Etterisolering innside vegg 10 cm	Etterisolering innside fasadeelement	Målte grensebetingelser
Midtstilt	84,6	-38	36	-23	-6
Inntrukket	141,5	48	29	48	48
Uttrukket - reell	-78	0	152	-29	42

5 DISKUSJON

I diskusjonene skal problemstillingen besvares.

- Kan numerisk beregning av kuldebro verifiseres med temperaturmålinger?
- Hvordan påvirker plassering av vindu i vegglivet kuldebroeffekten i bygg med vinduer med ramme- og karmprofil i aluminium?
- Hvordan vil etterisolering som tiltak påvirke kuldebro ved vindusinnsetting?
- Kan det designes en standard plassering av vindu i vegglivet for et optimalt energieffektivt bygg?

5.1 Målte temperaturer

I kapittelet blir resultatene fra temperaturmålingene analysert for henholdsvis prosjekt Campus Ås og Sørhellinga.

5.1.1 Campus Ås

Det har vært en mild vinter med svingende temperaturer. Det kan man se ut fra hvordan utetemperaturen ute varierer gjennom et døgn med plussgrader om dagen og minus om natten. Ut fra grafene i Figur 25 ser man at de målte temperaturene inne er mer stabile over tid enn temperaturene ut. Det skyldes at temperaturen inne er kontrollert og styrt for byggefasen. Grafene viser at det er varmest rundt kl. 14-15 og kaldest rundt kl. 22-23 hvert døgn. Det gjelder både for inne- og utetemperaturer. Det kan bety at lufttemperaturen ute bidrar til å varme opp bygget i løpet av dagen. Målingen på Campus Ås ble gjort over en helg. Det var minimalt med arbeidere på byggeplassen som kan ha påvirket innnetemperaturen. I tillegg sto varmeviftene i bygget mest sannsynlig på om natten for å sikre at ikke det blir for kaldt inne i bygget. Vindusinnsetting og plassering av målepunkter er vist i Figur 16.

Grafene i Figur 25 over innvendige overflatetemperaturer viser at de følger lufttemperaturen inne, mens de utvendige overflatetemperaturer følger lufttemperaturen ute. Inne- og utetemperaturer er i fase. Det kan indikere at temperatur i vindu og bygg raskt påvirkes av temperaturdifferansen. Ut fra dette kan en si at konstruksjonen vil reagere på endrede grensebetingelser av temperatur.

I Tabell 10 over gjennomsnittstemperaturer er inne beregnet til 16,1 °C. Det er en god del lavere enn hva temperaturen inne i bygget vil være når bygget står ferdig. Forskjellen i målt lufttemperatur og overflatetemperaturer inne er i snitt 1,7 °C grader. Innetemperaturgrafene i Figur 25 er noe hakkete med noe som ser ut som tilfeldige utslag på grafen. Det er usikkert hva ujevnhetene kommer av. En mulig forklaring er at bygget på dette tidspunkt ble oppvarmet av provisorisk varme fra varmluftsvifter. De kan jobbe i pulserende utslag. En annen mulig forklaring på ujevnhetene på grafen, er feil og mindre nøyaktighet ved måleutstyret.

Den varmeste overflaten er innvendig beslag. Den ligger rett under grafen til innetemperaturen og er beregnet til 15,1 °C (Tabell 10). Innvendig beslag ligger rundt foring. Innvendig bunnkarm er den nest varmeste overflaten på 13,8 °C (Tabell 10). Hvorfor innvendig beslag er varmere enn innvendig bunnkarm kommer av at bunnkarmen er plassert nærmere kald side i konstruksjonen enn innvendig beslag. Figur 25 viser at kurven til utetemperaturen og utvendig beslag i stor grad følger hverandre, men ved noen anledninger er den ene varmere enn den andre. Det kommer også frem ved beregnede gjennomsnittstemperaturer fra Tabell 10 at temperaturene er svært jevne. Gjennomsnittstemperaturen til uteluften er 2,2 °C, mens gjennomsnittstemperaturen til utvendig beslag er 2,3 °C. Det er bare litt over en tidels grad som skiller gjennomsnittstemperaturene. Det skyldes at utvendig beslag strekker seg over den luftede kledningen på fasaden. Det gjør at beslaget knapt er i kontakt med bygget, og det får derfor lite varmeoverføring fra bygningen. I tillegg er beslaget laget av aluminium som har lav varmekapasitet. Den utvendige bunnkarmen er varmere enn uteluften og utvendig beslag, siden karmen er nærmere varm side av konstruksjonen. Overflatetemperaturen til utvendig bunnkarm er beregnet til 3,2 °C.

5.1.2 Sørhellinga

Det var større variasjon på utetemperatur gjennom et døgn på Sørhellinga enn på Campus Ås. Målingen på Sørhellinga ble utført over lenger tid enn Campus Ås. Feltarbeidet på Sørhellinga ble utført på et senere tidspunkt nærmere våren enn Campus Ås. Sannsynligheten for større variasjon i værforhold vil øke. Begge målingene har likevel hatt en temperaturforskjell på inne- og utetemperatur på over 10 °C når de ble utført. Det er en fordel

når man skal studere varmetap ved feltarbeid. Vindusinnsetting og plassering av de fleste målepunkter er vist i Figur 19.

Det første en legger merke til ved Figur 30 er at det er et stort fall på samtlige målte temperaturer inne. Vinduet ble åpnet av noen underveis i målingen, og vinduet ble lukket så raskt det ble oppdaget. Dette skjedde ved midnatt, så vinduet ble ikke lukket igjen før dagen etter. Den gule grafen over innvendige overflatetemperaturer på sidefasadeelementet har størst fall i temperatur når vinduet ble åpnet. Det skyldes mest sannsynlig at vinduet ble åpnet i en vippestilling. Av den grunn ble sidefasadeelementet mest eksponert for uteluft sammenliknet med bunnfasadeelementet. Denne forstyrrelsen i målingen gjorde at alle temperaturmålingene når vinduet sto oppe ble påvirket, utenom utetemperaturen. Temperaturmålingene av innvendige overflater i etterkant av at vinduet ble lukket, ble til en viss grad svekket. Termoelementene på innvendige flater begynte mest sannsynlig å løsne etter at det var noen som tuklet med vinduet og termoelementene. Figur 20 i metodekapittelet viser hvordan termoelementene på innvendige flater så ut ved demontering av måling.

På lik linje som med temperaturmålingen fra Campus Ås, viser Figur 30 at de målte temperaturene inne er mer stabile over tid enn temperaturene ute. Ute temperaturer varierer mer gjennom et døgn. Grafene viser at det for hvert døgn er varmest en gang mellom kl. 12 og kl. 16 på dagen, og kaldes på natten en gang i tidsrommet fra kl. 01 – 06. Det gjelder både for inne- og utetemperaturene. Det store intervallet på maksimum- og minimumstemperaturer gjennom et døgn for målingene kan skyldes flere grunner. Det var stor variasjon i utetemperaturen i løpet av et døgn mellom de ulike dagene målingen pågikk.

Innetemperaturen reguleres gjennom et døgn ved at temperaturen senkes om natten, før den økes på dagtid. I tillegg vil lufttemperaturen ute bidra til å varme opp bygget i løpet av dagen. Sammenliknet med Figur 25 fra Campus Ås over målte temperaturer, følger innetemperaturene på Sørhellinga i større grad utetemperaturene. Det tyder på et større varmetap på Sørhellinga enn Campus Ås. Det kommer mest sannsynlig av at vinduene og veggene på Sørhellinga har dårligere U-verdi og en uttrukket vindusinnsetting. Vedlegg C og D viser varmestrømsberegninger som begrunner dette.

Gjennomsnittstemperaturer på Sørhellinga er beregnet over de tre døgnene etter at vinduet ble lukket. Det ville gitt misvisende gjennomsnittstemperaturer om de skulle inkludert tiden hvor vinduet var oppe. Det var mest stabile værforhold de tre siste dagene under målingen. I tillegg var to av tre dager helg, som betyr at det var mindre forstyrrelser fra studenter disse dagene. Selv om termoelementene muligens begynte å løsne på grunn av forstyrrelsen ved at noen

åpnet vinduet, viser Figur 30 lite endring mellom grafene før og etter vinduet ble åpnet. Det ble derfor besluttet å beregne gjennomsnittstemperaturer ut fra de siste tre døgnene.

Fra Tabell 15 er gjennomsnittstemperaturen inne beregnet til 22,4 °C. Etter innnetemperaturen følger overflatetemperaturen på innvendig sidefasadeelement som nest varmest med en gjennomsnittstemperatur på 20,0 °C. Grafen i Figur 30 over innvendig sidefasadeelement ser svært hakkete ut. Det er usikkert hva som gjør at overflatetemperaturen på sidefasadeelementet varierer slik, men den mest sannsynlige årsaken er at det går vannbåren varme parallelt med sidefasadeelementet til vinduet. Radiatoren har trolig en termostat som gir utslag ved å senke temperaturen. Det ser ut til at dette skjer hver 2,5 time. Det ble ikke lagt merke til radiatoren før termogrammene og temperaturmålingene ble analysert i etterkant. I metodedelene ble det belyst at termoelementene ikke bør settes opp i nærheten av en varmekilde. Det vil påvirke målingene. Det har skjedd her og grafen har en taggete kurve. Den lyse blå grafen i Figur 30 viser at innvendig bunnkarmen til enhver tid er kaldere enn sidefasadeelementet, hvis vi ser bort fra når vinduet ble åpnet. Den er målt til å ha en gjennomsnittstemperatur på 17,1 °C (Tabell 15). Det er nesten tre grader mindre enn temperaturen på sidefasadeelementet. Den store temperaturforskjellen på bunn- og sidefasadeelement har mest sannsynlig blitt forsterket på grunn av radiatoren som går langs veggen parallelt med sidefasadeelementet. Likevel tyder det på at bunnkarmen er kaldere enn sidekarmene, som antatt i metodekapittelet. Ved å måle og beregne varmetap for vindusinnsetting med utgangspunkt i bunnkarm vil det være det mest kritiske tilfellet.

Den lilla og grønne grafen i Figur 30 følger hverandre og har nesten samme temperatur til enhver tid. Utvendig beslag er den lilla grafen, mens utvendig sidefasadeelement er den grønne grafen. Fra Tabell 15 er gjennomsnittstemperaturen for utvendig beslag 4,5 °C, mens sidefasadeelement 3,7 °C. Den lille temperaturforskjellen mellom områdene kan bety at det er omtrent like stort varmetap gjennom utvendig beslag og utvendig sidefasadeelementet. Det utvendige beslaget sitter i underkant a vindusprofilen, og vinduet er plassert langt ut i vegglivet. Mye varme vil derfor gå ut gjennom vindusinnsettingen ved dette området. Gjennomsnittstemperaturen for uteluften er beregnet til 1,6 °C.

5.2 Termografering

I kapittelet blir resultatene fra termograferingen analysert for henholdsvis prosjekt Campus Ås og Sørhellinga.

5.2.1 Campus Ås

Figur 26 viser termogram og fotografi av vinduene på Campus Ås som det ble gjort målinger på. Termogrammet viser tydelig at det er kuldebro ved vindusinnsetting. Det er betydelig kaldere i området ved vinduskarmene enn på resten av veggen. I Vedlegg A er det flere termogrammer som ble tatt under feltarbeidet som viser kuldebro. Termogrammet i Figur 26 viser at vinduskarmen til det høyre vinduet er noe varmere enn det venstre vinduet, spesielt i toppkarmen. Figur 38 i Vedlegg A viser også at vinduskarmen til det høyre vinduet er noe varmere enn det venstre, selv når termogrammet er tatt i forskjellig vinkel. Det er vanskelig å si hva grunnen til dette kan være. Ved første inntrykk kan det tenke seg at det er forskjellig type vinduer med ulike vindusrammer og -karmen. Hvor det ene vinduet har isolerte profiler, mens det andre ikke. Likevel virker dette lite trolig ettersom vinduene ser like ut. Det kommer også frem fra plantegning til arkitekten at vinduene skal være av den samme typen. Vinduet til høyre står nærmere den andre veggen med vinduer i kontoret. Det gjør at det høyre vinduet får mer varmestråling reflektert fra vinduene på den andre veggen enn det venstre vinduet. En annen tenkt årsak til temperaturforskjellen på vinduene, er at det venstre vinduet ble åpnet i forkant av termograferingen og ble utsatt for uteluft. Likevel stemmer ikke dette. Det var bare det høyre vinduet som ble åpnet i forkant av termograferingen for å montere opp temperaturloggeren. Av den grunn burde det høyre vinduet være kaldere enn det venstre. En siste forklaring på temperaturforskjellingen på vinduskarmen på vinduene, kan komme av at veggen under det høyre vinduet ser varmere ut i Figur 26. Kanskje er det mer isolasjon i veggen her enn under det venstre vinduet. I Figur 27 av de samme vinduene på Campus Ås tatt en annen dag, er det ikke noe temperaturforskjell mellom vinduene eller veggen under vinduene. Det viser at det ikke er sikkert å ta beslutninger på bakgrunn av termogrammer. Forhold under termografering kan endre seg og påvirke termogrammene.

Termogrammene ble tatt med vinkel for å unngå refleksjon av fotografen i vindusruten. Figur 26 viser at vinduskarmen fra den andre veggen er reflektert i den høyre vindusruten. Glass reflekterer mye stråling. På vinduet ble en tape med høy emissivitet festet til vindusruten for å se forskjell på reflektert varmestråling mellom glassruten og tapen. I Figur 26 fremstår

området som er dekket av tapebiten varmere enn resten av ruten. Vinduet har en lavere emissivitet enn tapen. Det gjør at ruten sender ut mindre stråling. Ruten fremstår derfor kaldere enn området som er belagt med tape. Kameraet er stilt inn med en emissivitet på 0,95. Tapen har en tilnærmet lik emissivitet. Det gjør at overflatetemperaturen som fremstår på tapebiten er rimelig korrekt. Emissiviteten til ulike materialer gjør at overflatetemperaturer i termogram kan fremstår misvisende. Termografering er muligens ikke den beste metoden for å undersøke overflatetemperaturer, spesielt ikke av overflater som reflekterer mye varmestråling. Det burde også vært festet en tape til karmprofilen siden aluminium reflekterer mye varmestråling.

Fargen på bunnkarmen på det høyre vinduet i Figur 26 viser en blågrønn farge. Ved å lese av temperaturskalaen på termogrammet, er en blågrønn farge ca. 15 °C. I området hvor innvendig beslaget er festet rundt foringen er termogrammet gult. En gul farge er ca. 16 °C ut fra temperaturskalaen. I Tabell 10 over målte gjennomsnittstemperaturer er innvendig bunnkarm beregnet til å være 13,8 °C. Innvendig beslag er beregnet til 15,1 °C. Sammenliknet med temperaturene fra termogrammet, ligger de målte overflatetemperaturene ca. én grad lavere enn temperaturene fra termogrammene. Termogrammet i Figur 27 ble ikke tatt på samme tidspunkt som temperaturmålingen ble utført. Det er derfor ikke like sammenliknbart som termogrammet i Figur 26. Likevel var værforholdene stort sett like som under målingen. Punktet i termogrammet i Figur 27 viser en overflatetemperatur på 13,4 °C på innvendig bunnkarm. Denne temperaturen er nærmere målt temperatur fra termoelementet. Det viser at det er mulig å gi et estimat på overflatetemperatur ved bruk av termogram, men ikke angi nøyaktige overflatetemperaturer.

5.2.2 Sørhellinga

I Figur 31 av termogram og fotografi av vinduene som ble brukt under feltarbeidet på Sørhellinga, er det betydelig kaldere i området ved vinduene enn på resten av veggen. Det viser at det også her er kuldebro ved vindusinnsetting. I Vedlegg A er det flere termografier som viser at det er kuldebro. Hele vinduet inkludert vinduskarm er i større grad sammen farge, her blått, sammenlignet med Figur 26 og Figur 27 av vinduene på Campus Ås. Det kan tyde på dårligere vinduer og en plassering av vinduet langt ut i vegglivet på Sørhellinga, noe som også er tilfellet. På Sørhellinga er vinduene med tolags glass og en uttrukket vindusinnsetting, mens på Campus Ås er vinduene med trelags glass og en midtstilt

vindusinnsetting. Figur 32 viser tydelig intern kuldebro i vinduet i overgangen mellom glass og rammeprofil. Blåfargen i dette området er betydelig mørkere. Det er ikke denne kuldebroen som er studert i oppgaven.

Det kommer frem fra Figur 31 og Figur 32 at det er varmekilde langs veggen ut mot vinduene som ble brukt under feltarbeidet. Det er rør med vannbåren varme. De ble først lagt merke til etter feltarbeidet var gjennomført, da termogrammene og grafene over målte temperaturer ble analysert. I Figur 32 er varmestråling fra radiatoren reflektert i vindusruten. Som nevnt tidligere reflekterer materialer som glass og metaller mye varmestråling. På lik linje med feltarbeidet på Campus Ås, ble et område på vindusruten tapet. Ved å sammenlikne området med tapen og ruten, gir det et inntrykk på hvor mye varmestråling som blir reflektert i ruten. Figur 32 viser at området på vindusruten med tape har en annen farge. Det forteller at glassruten har en annen emissivitet enn tapen og temperaturen som fremstilles på glassruten ikke er til å stole på. Det burde også her blitt tapet på aluminiumsprofilen for å se utslag av reflektert varmestråling fra vindusprofilene.

Termogrammene i Figur 31 og Figur 32 fra Sørhellinga viser en temperatur på bunnrammen på henholdsvis 15,8 °C og 15,6 °C. Gjennomsnittstemperaturen fra målingen på innvendig bunnfasadeelementet ble målt til 17,1 °C (Tabell 15). Bunnfasadeelementet ligger rett nedenfor bunnrammen til vinduet. Det er over én grad temperaturforskjell. Ut fra termogrammet i Figur 32 ser det ut som topp- og sidevindu profiler er noe varmere enn bunnprofiler. Det kan stemme med at det vanligvis er kaldras fra ruten som gjør at bunnprofilen blir kaldere. Det er vanskelig å lese av en nøyaktig temperatur i temperaturskalaen i Figur 31 og Figur 32. Skalaene i termogrammene dekker et for stort intervall av temperaturer på grunn av varmekilden. I Figur 40 i Vedlegg A viser punktet i termogrammet på sidekarmen 16,2 °C. Det er en høyere temperatur enn på bunnrammen fra Figur 31 og Figur 32. Den målte gjennomsnittlige overflatetemperaturen på sidefasadeelement er 20,0 °C (Tabell 15). Verdien er ikke helt sammenliknbar med termogrammet siden målingen ble gjort på det andre sidefasadeelementet nærmere radiatoren. Likevel viser resultatene at temperaturen stiger oppover langs vindusramme og -karm.

5.3 Modellering

I kapittelet blir resultatene fra modelleringen analysert for henholdsvis prosjekt Campus Ås og Sørhellinga.

5.3.1 Campus Ås

Det er tre vindusposisjoner som er studert. De er vist i Figur 23 i metodekapittelet. Det ene er en midtstilt vindusinnsetting. Det er den reelle vindusinnsettingen på Campus Ås, og den som feltarbeidet er blitt utført på. Posisjonen i vegglivet for den midtstilte vindusinnsettingen er 118 mm inn i vegglivet fra utside vindsperre til utvendig kant av vinduskarm. Den andre vindusinnsettingen som er studert er en inntrukket vindusposisjon. Her er vinduet plassert langt inn i veggen mot varm side av konstruksjonen. Avstanden fra utside vindsperre til enden av karmprofil er 223 mm for denne posisjonen. Den siste vindusposisjonen som er undersøkt er en uttrukket vindusinnsetting. Vinduet er her plassert ut i vegglivet mot kald side med en avstand på 13 mm fra utside vindsperre til utside kant av vinduskarm. Tabell 12 gir oversikt over beregnede kuldebroverdier fra simuleringer i WinIso2D for ulike vindusinnsettinger og tiltak på Campus Ås. Vedlegg C og D inneholder fullstendige beregninger av kuldebroverdier i Excel og utvalgte simuleringer fra WinIso2D.

Tabell 13 er en oversikt over differansen mellom beregnede kuldebroverdier i Tabell 12 og (reell) midtstilt vindusinnsettingen for dagens konstruksjon. Tabell 14 er en oversikt over prosentvis endring i kuldebroverdier i Tabell 12, sammenliknet med (reell) midtstilt vindusinnsettingen for dagens konstruksjon.

Dagens konstruksjon

Tabell 12 viser at de beregnede kuldebroverdiene for dagens konstruksjon for (reell) midtstilt, inntrukket og uttrukket vindusinnsetting er henholdsvis 0,016 W/(mK), 0,038 W/(mK) og 0,037 W/(mK). Resultatene viser at den midtstilte vindusinnsettingen gir en betraktelig mindre kuldebroverdi enn både vindusinnsettingen som er inntrukket og uttrukket. Det viser også at det er omtrent like dårlig med en vindusinnsetting langt ut eller langt inn vegglivet for denne konstruksjonen. I kapittel 2.7.2 «Vinduets plassering i vegglivet» er en noe inntrukket eller midtstilt vindusinnsetting presentert som den vindusposisjonen som gi minst varmetap.

Det vil si at beregningene stemmer med teorien. Figur 28 i resultatkapittelet viser et eksempel på modellering av dagen konstruksjon på Campus Ås.

Som nevnt i metodekapittelet er U-verdien til vegg på Campus Ås oppgitt til å være 0,11 W/(m²K) fra produsenten. Vedlegg C viser at den gjennomsnittlige U-verdien for vegg er simulert til 0,157 W/(m²K) for dagens konstruksjon. U-verdien fra produsenten for en ISO-3 vegg er nesten 0,05 W/(m²K) lavere enn hva modellering i WinIso2D har beregnet.

Forskjellen i U-verdi er ikke så stor, men den lille differansen mellom verdiene kan komme av flere årsaker. Beregningene fra produsent er trolig forskjellig fra WinIso2D. Likevel gjør nok begge beregningsprosedyrene forenklinger av konstruksjon og valg av materialer (innlagte U-verdier). WinIso2D vil også ha en viss numerisk feil. Programmet forenkler fysisk tilnærming, for eksempel ved å bruke varmeovergangsmotstand og korrigert U-verdi i hulrom.

U-verdien til vinduet på Campus Ås fra vindusprodusenten er oppgitt til å være 0,79 W/(m²K). Modellert kuldebroverdi er 0,992 W/(m²K) for dagens konstruksjon (Vedlegg C). Det er omtrent 0,2 W/(m²K) lavere U-verdi fra produsenten. Den store forskjellen i U-verdi kan være et resultat av flere årsaker. Som nevnt i metodekapittelet ble det gjort en antakelse på U-verdi for vindusruten basert på erfaringsverdier fra Schüco og egenskaper for avstandslist mellom glassene. I tillegg er beregningene fra produsent trolig forskjellig fra WinIso2D.

Etterisolere av innside vegg 10 cm

I Tabell 12 under «Etterisolering innside vegg 10 cm» er beregnede kuldebroverdier etter at innside vegg ble isolert. De påfølgende kuldebroverdiene etter tiltaket med etterisolering på innside vegg gir 0,018 W/(mK), 0,032 W/(mK) og 0,044 W/(mK) for henholdsvis den midtstilt (reell) vindusposisjonen, inntrukket og uttrukket vindusinnsetting. Resultatet viser at kuldebroverdiene øker for midtstilt og uttrukket vindusinnsetting. Grunnen til dette ligger i at U-verdien til veggen blir betydelig mindre av mer isolasjon, samtidig som U-verdien til hele vindusinnsettingen ikke reduseres i like stor grad som veggen. Figur 41 i Vedlegg B viser et eksempel på hvordan etterisolering av innside vegg ble utført på Campus Ås.

For vindusposisjonene som er inntrukket reduseres kuldebroverdien etter isolering av vegg. Grunnen til dette er at U-verdien til vindusinnsettingen i større grad minker sammenliknet

med U-verdien til vegg. Etterisolering av en inntrukket posisjon vil gjøre vindusinnsettingen mer midtstilt. Det viser seg å være en mer optimal vindusinnsetting.

På den andre siden vil varmetapet ved kuldebro i en uttrukket vindusinnsetting med etterisolert innvendig vegg forverres atskillig. Sammenliknet med (reell) midtstilt vindusinnsetting, vil en uttrukket vindusinnsetting med etterisolert vegg i henhold til Tabell 14 øke med hele 177 %. Det kommer av at posisjonene til vinduet i vegglivet forsterkes ved å legge på mer isolasjon på innside av vegg. En allerede dårlig løsning blir i dette tilfellet verre.

Resultatene over viser at kuldebroeffekten i de fleste tilfellene øker ved å etterisolere innside vegg. Etterisolering av vegg kan likevel være et godt alternativ. Varmetapet fra vegg redusere betraktelig og kan redusere det totale varmetapet fra en bygning. Det kan føre til at kuldebro står for en større andel av det totale varmetapet til en bygning. Spørsmålet er om forbedringen av vegg vil bli utliknet med økt kuldebroeffekt. Da forsvinner poenget med etterisolering av vegg.

Etterisolering av innside karm

I Tabell 12 under «Etterisolering innside karm» er beregnede kuldebroverdier etter at innside vinduskarm ble isolert. Resultatet viser at kuldebroverdien for (reell) midtstilt vindusinnsettingen er på 0,013 W/(mK), 0,038 W/(mK) for inntrukket vindusinnsetting og 0,026 W/(mK) for uttrukket vindusinnsetting. Sammenliknet med kuldebroverdiene før etterisoleringen av innside vinduskarm ble utført, har kuldebroverdien for midtstilt og uttrukket vindusinnsetting blitt redusert. Kuldebroverdi for inntrukket vindusinnsetting er uendret. Grunnen for at kuldebroverdiene har minket for midtstilte og uttrukket vindusposisjonen er at U-verdien til vindusinnsettingen i større grad er redusert sammenliknet med U-verdien til vinduet. Isolering av karm vil forskyve strømningsvei for kuldebro oppover i vinduet. Figur 42 i Vedlegg B viser et eksempel på hvordan etterisolering av innside vegg ble utført på Campus Ås.

U-verdiene til vinduene på Campus Ås er blitt bedre ved å etterisolere innside karm (Vedlegg C). Det er ulik tykkelse av isolering på innside karm mellom de forskjellige vindusinnsettingene, likevel er U-verdiene til vinduene like. Etterisolering av innside vindusprofil på Campus Ås ble gjort på nedre del av profilen, altså karmen, siden vinduet er åpningsbart. Av den grunn utgjøre vinduskarmen et forholdvis lite areal. Derfor kan

isolasjonsområdet på innside karm utgjøre en så liten forskjell mellom de ulike løsningene at det ikke gjør store nok utslag på U-verdiene til vinduene.

Kuldebroverdien til vindusposisjonen inntrukket i vegglivet er uendret fordi etterisoleringen av karmen utgjør en så liten forskjell i denne posisjonen. Det er så lite plass igjen til å etterisolere innside vinduskarm når vinduet er plassert nesten helt inn i vegglivet. I tillegg reduseres U-verdien til hele vindusinnsettingen i like stor grad som U-verdien til vinduet.

Av alle konstruksjonene som er studert er (reell) midtstilt vindusinnsetting med etterisolering av innside karm den løsningen som gir lavest kuldebroverdi. Løsningen vil redusere varmetapet ved midtstilt vindusinnsetting. Ulempen med etterisolering på innside karm er at faren for kondens i området rundt karmprofil og glass vil øke. Det må derfor tas en vurdering på hvor stor kondensfare en tilleggisolering på innside karm vil føre til.

Målte grensebetingelser

Ved målte grensebetingelser er inne- og utetemperaturen i beregningene endret til målte temperaturer fra Tabell 10. Beregningene er gjort på dagens konstruksjon. I kolonnen for målte grensebetingelser i Tabell 12 er de beregnede kuldebroverdiene for henholdsvis (reell) midtstilt, inntrukket og uttrukket vindusinnsetting 0,005 W/(mK), 0,028 W/(mK) og 0,029 W/(mK). Kuldebroverdien for (reell) midtstilt vindusinnsetting gir et inntrykk på hva den reelle kuldebroverdien var på tidspunktet målingene ble utført. Sammenliknet med kuldebroverdiene fra dagens konstruksjon med standard grensebetingelser er alle kuldebroverdiene med målte grensebetingelser blitt lavere. Temperaturforskjellen mellom inne- og utetemperatur er på 13,9 °C. Det er en mindre temperaturdifferanse enn standard grensebetingelser på 20 °C. Tabell 12 viser at å regne med standard grensebetingelser med en temperaturdifferanse på 20 °C eller høyere ser man på det verste tilfellet. Det er sjelden en temperaturdifferanse på 20 °C mellom inne- og utetemperatur i sommerhalvåret. Likevel vil temperaturdifferanse mellom inne- og utetemperatur ofte være større enn 20 °C om vinteren.

Figur 29 viser modellering med målte grensebetingelser på Campus Ås. Temperaturene i figuren er hentet ut fra modellen og angir temperatur for valgt element. Plasseringen av overflatetemperaturene i figuren har samme plassering som målepunkter under feltarbeidet. Modellen er delt opp i veldig mange elementer. Det vil si at temperaturen i punktet som er valgt er rimelig presist for plassering i modellen. Overflatetemperaturen på innvendig bunnkarm viser en temperatur på 14,20 °C, utvendig bunnkarm 2,72 °C og innvendig foring

16,08 °C. Innvendig foring har samme plassering som innvendig beslag under feltarbeidet. Forskjellen er at det ikke ble modellert med beslag rundt foringen. Overflatetemperatur på utvendig beslag er ikke med i Figur 29 siden utvendig kledning ikke ble modellert. Utvendig beslag bretter seg over utvendig kledning. Gjennomsnittstemperaturene fra målingen i Tabell 10 viser at innvendig bunnkarm, utvendig bunnkarm og innvendig foring er henholdsvis 13,8 °C, 3,2 °C og 15,1 °C. Ved å sammenlikne overflatetemperaturene i Figur 29 med Tabell 10 viser det at modelleringsresultatet ligger ca. 0,5-1 °C høyere enn feltarbeidet. En mulig årsak til at temperaturene fra modelleringen er høyere, kan komme av at det ikke er vind eller andre luftstrømmer til stede ved modellering, men det er det ute i felt.

Estimert kuldebroverdi

Tabell 11 viser estimerte varmetap og kuldebroverdier ved vindusinnsetting på Campus Ås. Beregningen er gjort med utgangspunkt i gjennomsnittstemperatur for innvendige flater hentet fra Tabell 10. Den estimerte kuldebroverdien med utgangspunkt i overflatetemperatur på innvendig bunnkarm er beregnet til 0,026 W/(mK), mens estimerte kuldebroverdi med utgangspunkt i overflatetemperatur på innvendig beslag er beregnet til 0,011 W/(mK). Grunnen til at estimert kuldebroverdi er mindre med utgangspunkt i temperatur på innvendig beslag enn innvendig bunnkarm, kommer av at overflatetemperaturen er varmere på innvendig beslag. Temperaturforskjellen mellom innetemperaturen og innvendig beslag blir mindre, sammenliknet med temperaturforskjellen mellom innetemperatur og innvendig bunnkarm. Denne faktoren multipliseres inn i beregningen av kuldebroverdien. Beregnet kuldebroverdi til (reell) midtstilt vindusinnsetting med målte grensebetingelser fra modellering er 0,005 W/(mK) (Tabell 12). Estimerte kuldebroverdi med utgangspunkt i overflatetemperatur på innvendig beslag er nærmest denne verdien. Det vil si at overflatetemperaturen på innvendig beslag indikerer varmetapet fra vindusinnsetting på en bedre måte enn overflatetemperaturen på innvendig bunnkarm.

Det er viktig å påpeke at de estimerte kuldebroverdiene for vindusinnsettingene bare er estimater på kuldebroverdi. De kan bare gi en pekepinn på omtrentlig kuldebroverdi ved vindusinnsetting, mens numerisk beregnede kuldebroverdier er i mye større grad nøyaktige i forhold til standard. Estimert kuldebroverdi avhenger av den innvendige varmeovergangsmotstanden. Det er ofte svært usikkert hva den er. I beregningen brukes en standardisert varmeovergangsmotstand etter NS-EN ISO 13788:2012. Verdien kan skille seg fra hva den reelle varmeovergangsmotstanden er. Estimert kuldebroverdi baserer seg på at

varmestrømmen fra kuldebro bare går gjennom monteringsfugen, noe som ikke er realiteten. I tillegg baserer estimert kuldebroverdi seg på innvendige målte overflatetemperatur i nærheten til kulebro. Disse temperaturen i seg selv er det også noe usikkerhet rundt.

5.3.2 Sørhellinga

På lik linje med prosjekt Campus Ås, er det studert tre ulike vindusposisjoner på Sørhellinga. De er vist i Figur 24 i metodekapittelet. Den ene posisjonen av vinduet er midtstilt i vegglivet, mens den andre er inntrukket og den siste uttrukket. På Sørhellinga er det vindusinnsettingen som er uttrukket i vegglivet som er den reelle vindusposisjonen, og den som feltarbeidet er blitt utført på. Avstanden fra utside vindsperre til utside kant av vinduskarm er -78 mm. Det vil si at vinduet er plassert på utsiden av vindsperren. Posisjonen i vegglivet for den midtstilte vindusinnsettingen er 84,6 mm inn i vegglivet, mens vindusinnsettingen som er inntrukket er plassert i en posisjon på 141,5 mm. Tabell 17 gir oversikt over beregnede kuldebroverdier fra simuleringer i WinIso2D for ulike vindusinnsettinger og tiltak på Sørhellinga. Vedlegg C og D inneholder fullstendige beregninger av kuldebroverdier i Excel og utvalgte simuleringer fra WinIso2D.

Tabell 18 er en oversikt over differansen mellom beregnede kuldebroverdier i Tabell 17 og (reell) midtstilt vindusinnsettingen for dagens konstruksjon. Tabell 19 er en oversikt over prosentvis endring i kuldebroverdier i Tabell 17, sammenliknet med (reell) midtstilt vindusinnsettingen for dagens konstruksjon.

Dagens konstruksjon

Tabell 17 viser at de beregnede kuldebroverdiene for dagens konstruksjon for midtstilt, inntrukket og (reell) uttrukket vindusinnsetting er henholdsvis 0,023 W/(mK), 0,054 W/(mK) og 0,037 W/(mK). Akkurat som på Campus Ås prosjektet er det den midtstilte vindusinnsettingen som gir den laveste kuldebroverdien. Den er 38 % (Tabell 19) lavere enn den reelle vindusposisjonen på Sørhellinga. Uttrukket (reell) vindusinnsetting har nest lavest kuldebroverdi, mens vindusposisjonen som er inntrukket i vegglivet gir den dårligste kuldebroverdien. U-verdien til vegg og vindu er like for alle vindusinnsettingene. U-verdi til vindusinnsettingene er forskjellige. Den midtstilte vindusinnsettingen har den laveste U-verdien av konstruksjonen. Det gjør at den midtstilte vindusposisjonen får den laveste

kuldebroen med det minste varmetapet. Figur 33 i resultatkapitlet viser et eksempel på modellering av dagen konstruksjon på Sørhellinga.

Etterisolering av innside vegg 10 cm

I neste kolonne i Tabell 17 er kuldebroverdiene av de ulike vindusinnsettingene et resultat av 10 cm isolasjon på innside vegg. Ved å isolere veggen innvendig med 10 cm isolasjon vil U-verdien til vegg reduseres betraktelig (Vedlegg C). Det samme gjelder i stor grad for alle vindusinnsettingene. Veggen er av massivtre og har ikke noe varmeisolasjon i veggen fra før. De påfølgende kuldebroverdiene etter tiltaket med etterisolering på innside vegg gir 0,050 W/(mK), 0,047 W/(mK) og 0,092 W/(mK) for henholdsvis den midtstilte vindusposisjonen, inntrukket og uttrukket (reell) vindusinnsetting. Figur 43 i Vedlegg B viser et eksempel på hvordan etterisolering av innside vegg ble utført på Sørhellinga.

På lik linje med konstruksjonene på Campus Ås, har kuldebroverdien til inntrukket vindusinnsetting blitt redusert, mens kuldebroverdien til de to andre vindusinnsettingene har økt. Resultatet viser nå at en inntrukket vindusinnsetting er å foretrekke. Det er et resultat av at U-verdien til inntrukket vindusinnsetting i større grad har minket sammenliknet med de andre vindusinnsettingene. Etterisolering når vinduet er plassert langt inn i vegglivet, vil gjøre vindusinnsettingen mer midtstilt. Det har vist seg å være den vindusposisjonen som gir minst varmetap.

Både kuldebroverdien til midtstilt og (reell) uttrukket vindusposisjonen har blitt større etter isoleringen av vegg, spesielt den reelle vindusinnsettingen. Den har økt med 152 % (Tabell 19). Det kommer av at posisjonene til vinduet i vegglivet forsterkes ved å legge på mer isolasjon på innside av vegg. Det gjør at U-verdien til vindusinnsettingen ikke reduseres i like stor grad som veggen.

Etterisolering av innside fasadeelement

I Tabell 17 under etterisolering ramme, er beregnede kuldebroverdier etter at innside fasadeelement ble isolert. Resultatet viser at kuldebroverdien for den midtstilte vindusinnsettingen er på 0,028 W/(mK), 0,054 W/(mK) for inntrukket og 0,026 W/(mK) for (reell) uttrukket vindusinnsetting. Sammenliknet med kuldebroverdiene før etterisoleringen av innside fasadeelement ble utført, har kuldebroverdien for midtstilt vindusinnsetting steget. Inntrukket vindusinnsetting er uendret og uttrukket (reell) vindusinnsetting minket. Figur 44 i

Vedlegg B viser et eksempel på hvordan etterisolering av innside vegg ble utført på Sørhellinga.

Kuldebroverdien har økt for midtstilt vindusposisjon siden U-verdien til vinduet i større grad er redusert sammenliknet med U-verdien til vindusinnsettingen. Kuldebroverdien til vindusposisjonen inntrukket i vegglivet er uendret fordi det ikke var mulig å etterisolere fasadelemente på innsiden når vinduet er plassert helt inn i vegglivet. Kuldebroverdien til reell vindusinnsetting uttrukket i vegglivet er redusert betraktelig. Det er mest plass til isolasjon på innside karm når vinduet er plassert helt ut i vegglivet mot kald side. U-verdien til vindusinnsettingen er redusert i større grad enn U-verdien til vinduet. Isolering av karm vil redusere og forskyve strømningsvei for kuldebro oppover mot vinduet.

Målte grensebetingelser

Ved målte grensebetingelser er inne- og utetemperaturen i beregningene endret til målte temperaturer fra Tabell 15. Beregningene er gjort på dagens konstruksjon. I kolonnen for målte grensebetingelser i Tabell 17 er de beregnede kuldebroverdiene for henholdsvis midtstilt, inntrukket og (reell) uttrukket vindusinnsetting 0,034 W/(mK), 0,054 W/(mK) og 0,052 W/(mK). Kuldebroverdien for (reell) uttrukket vindusinnsetting gir et inntrykk på hva den reelle kuldebroverdien var på tidspunktet målingene ble utført. Sammenliknet med kuldebroverdiene for dagens konstruksjon med standard grensebetingelser er kuldebroverdiene for midtstilt og uttrukket vindusplassering blitt høyere, mens inntrukket vindusinnsetting har forblitt uendret. Økningen i kuldebroverdiene kommer av at temperaturforskjellen mellom inne- og utetemperatur er 20,8 °C er en større temperaturdifferanse enn ved standard grensebetingelser på 20 °C.

Figur 34 viser modellering med målte grensebetingelser på Sørhellinga. Temperaturene i figuren er hentet ut fra modellen og angir temperatur for valgt element. Plasseringen av overflatetemperaturene i figuren har samme plassering som målepunktene under feltarbeidet. Overflatetemperaturen på innvendig bunnfasadeelement viser 17,52 °C og på utvendig beslag 2,21 °C. Overflatetemperatur fra innvendig og utvendig sidefasadeelement er ikke med i Figur 34 siden modelleringen er gjort over et vertikalt snitt av vindusinnsettingen.

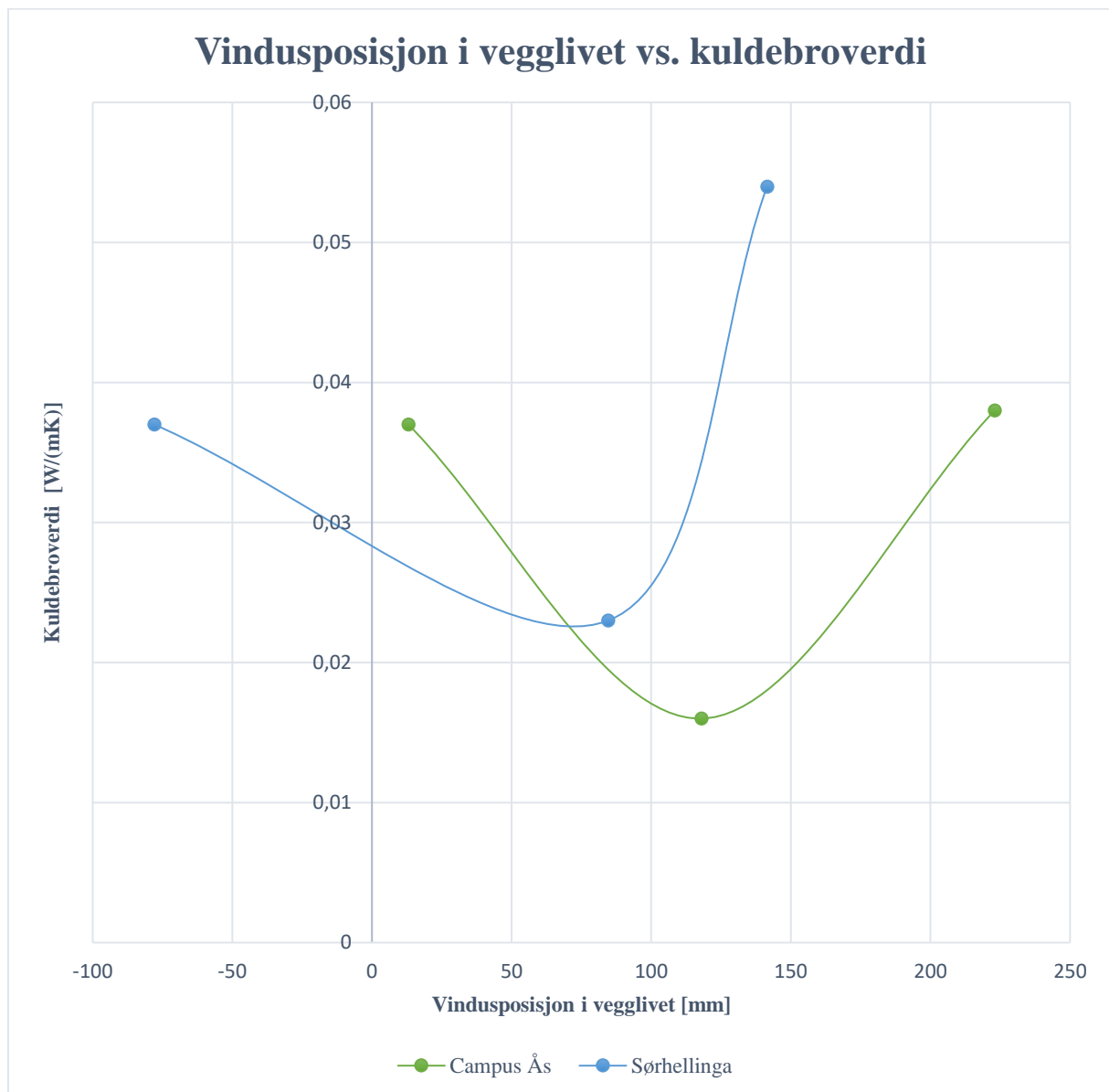
Gjennomsnittstemperaturene fra målingen i Tabell 15 viser at innvendig bunnfasadeelement og utvendig beslag er henholdsvis 17,1 °C og 4,5 °C. Ved å sammenlikne overflatetemperaturene i Figur 34 med Tabell 15 viser det at modelleringsresultatet ligger noe

høyere i temperatur for innvendig bunnfasadeelement enn for feltarbeidet. Utvendig beslag viser det motsatte. Her ligger modelleringsresultat lavere enn målingen fra feltarbeidet, og det med flere grader. En mulig årsak til overflatetemperaturene fra modellering på prosjekt Sørhellinga i større grad skiller seg fra feltarbeidet kan komme av at konstruksjonene var forskjellige. Feltarbeidet ble gjort på et åpningsbart vindu i vindusfasaden på Sørhellinga, mens modelleringen ble gjort på vindusfasaden ved siden av det åpningsbare vinduet. Det kan utgjøre en betydelig forskjell og er nærmere beskrevet i metodekapittelet.

Estimert kuldebroverdi

Tabell 16 viser estimert varmetap og kuldebroverdier ved vindusinnsetting på Sørhellinga. Beregningen er gjort med utgangspunkt i gjennomsnittstemperatur for innvendige flater hentet fra Tabell 15. Den estimerte kuldebroverdi med utgangspunkt i overflatetemperatur på innvendig bunnfasadeelement er beregnet til $0,012 \text{ W/(mK)}$, mens estimerte kuldebroverdi med utgangspunkt i overflatetemperatur på innvendig sidefasadeelement er beregnet til $0,005 \text{ W/(mK)}$. Estimert kuldebroverdi er mindre med utgangspunkt i temperatur på innvendig sidefasadeelement enn innvendig bunnfasadeelement. Overflatetemperaturen er varmere på innvendig sidefasadeelement enn på innvendig bunnfasadeelement. Det gjør at temperaturforskjellen blir mindre mellom innetemperaturen og innvendig sidefasadeelement, sammenliknet med temperaturforskjellen mellom innetemperatur og innvendig bunnfasadeelement. Denne faktoren multipliseres inn i beregningen av kuldebroverdien. Beregnet kuldebroverdi til (reell) uttrukket vindusinnsetting med målte grensebetingelser fra modellering er $0,052 \text{ W/(mK)}$ (Tabell 17). Estimert kuldebroverdi med utgangspunkt i overflatetemperatur på innvendig bunnfasadeelement er nærmest denne verdien. Det vil si at overflatetemperaturen på innvendig bunnfasadeelement indikerer varmetapet fra vindusinnsetting på en bedre måte enn overflatetemperaturen på innvendig sidefasadeelement. Modelleringen er gjort over et vertikalt snitt gjennom vinduet hvor innvendig bunnfasadeelement er en overflate i snittet, det er ikke innvendig sidefasadelement. Ikke nok med det er overflatetemperaturen på innvendig sidefasadeelement påvirket av radiatoren langs veggen. Resultatet er derfor ikke så overraskende. Likevel er estimert kuldebroverdi langt fra modellert kuldebroverdi. Grunnen til dette kan være som nevnt tidligere, at konstruksjonene i feltarbeidet og modelleringen ikke var helt identiske. I tillegg er estimering av kuldebroverdi en svært unøyaktig metode for å dokumentere kuldebroverdi.

5.4 Sammenstilling modellresultat Campus Ås og Sørhellinga



Figur 35 Grafisk fremstilling av vindusposisjon i vegglivet vs. kuldebroverdi for dagens konstruksjon på Campus Ås og Sørhellinga.

I Figur 35 er en grafisk fremstilling av kuldebroverdiene fra Tabell 12 og Tabell 17 av dagens konstruksjon på prosjekt Campus Ås og Sørhellinga. Figuren sammenlikner vinduets posisjon i vegglivet med beregnet kuldebroverdi. Grafene er bare basert på tre punkter hver, som betyr at kurven mellom punktene bare er en tenkt kurve over hvordan kuldebroverdiene for hver av byggene kunne ha vært ved andre vindusinnsetninger. Som nevnt tidligere er Campus Ås og Sørhellinga to bygninger med svært ulike vindusinnsetting og konstruksjonsoppbygning. Det

gjør at grafene skiller seg en god del fra hverandre. Likevel viser begge grafene at en midtsilt vindusinnsetting gir den laveste kuldebroverdien, mens en inntrukket høyest.

Ved å sammenlikne grafene fra de to ulike prosjektene kan det gi en betraktning på hvor den mest optimale vindusposisjonen i vegglivet er for å minimere kuldebroeffekten. Begge grafene viser at en midtsilt vindusinnsetting er å foretrekke. Intervallet mellom de midtstilte kuldebroverdiene på Campus Ås og Sørhellinga vil kunne indikere optimal vindusinnsetting for å minimere kuldebro. Det vil si at et sted mellom 84,6 mm og 118 mm innover i vegglivet fra utside vindspærre til ende av vinduskarm, er den mest optimale plasseringen av vinduet i vegglivet med utgangspunkt i disse to byggene. Med flere prosjekter med ulike vindusinnsettinger og konstruksjoner av vegg, vindu og monteringsfuge ville resultatet blitt betraktelig forsterket. Det ville gitt en bedre indikasjon på den beste vindusinnsettingen for å minimere varmetap fra kuldebro.

Figur 11 i teorikapittelet viser ulike vindusinnsettinger av trevindu i vegg av bindingsverk av tre med tilhørende kuldebroverdier. Figuren viser at en forholdsvis midtstilt vindusinnsetting er mest optimal for å minimere kuldebroverdi og at en uttrukket og inntrukket vindusinnsetting er dårligere løsninger. Det samme viser resultatene i Figur 35. Av den grunn viser det at vinduer med aluminiumsprofiler oppfører seg stort sett på samme måte som trevinduer. Posisjonen til vindu i vegglivet er derfor like relevant for aluminiumsvinduer, som det er for trevinduer når det er snakk om å minimere kuldebroverdi ved vindusinnsetting.

For konstruksjonen i Figur 11 er det en vindusinnsetting med en avstand 35 mm fra utside av vindspærre til utvendig kant av vinduskarm som er den mest optimale vindusposisjonen. Den gir en kuldebroverdi på 0,01 W/(mK). Vindusinnsettingen er ikke midtstilt i vegglivet, men den er trukket noe inn i vegglivet. Det kan tenkes at ved å flytte de midtstilte vindusinnsettingene på Campus Ås og Sørhellinga noe lenger ut i vegglivet på lik linje med Figur 11, vil kunne gi lavere kuldebroverdier. Grafen til Sørhellinga i Figur 35 viser å indikere dette.

Med fokus på å minimere kuldebroverdi for vindusinnsetting er det lett å glemme en viktig faktor som kan være like viktig for byggets energiregnskap og levetid. Prosjektering og montasje av vindusinnsettingen er helt sentral for å få en vind- og vanntett konstruksjon. En midtstilt eller inntrukket vindusposisjon er vanskeligere å tette mot fukt enn en uttrukket vindusinnsetting. Derfor vil en konstruksjon med mindre kuldebroverdi som regel ha større fare for fukt i konstruksjonen enn en konstruksjon med større kuldebroverdi.

5.5 Krav

Kuldebroer skal sammenliknes opp mot kravet om normalisert kuldebroverdi. Kravet til normalisert kuldebroverdi er som nevnt i teoridelen i kapittel 2.2 $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for småhus og $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for boligblokk/øvrige bygninger. For å ha et sammenlikningsgrunnlag må alle typer kuldebroer i bygningen beregnes, summeres og deles på oppvarmet bruksareal (BRA). For utført målesteder og beregningssteder er det kun vurdert kuldebroer rundt vinduer, og en kan derfor ikke vurdere om beregnede kuldebroverdier er akseptable i forhold til kravet.

I Prosjektrapport 25 – *Kuldebroer – Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk* av SINTEF Byggforsk er det et eksempel på beregning av normalisert kuldebroverdi. I Tabell 6 på s. 48 i rapporten er normalisert kuldebro beregnet for en bygning med en løsning med lite kuldebroer og «normale» kuldebroer. Normalisert kuldebroverdi for løsningen med lite kuldebroer er beregnet til $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ og «normale» kuldebroer $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. I regnestykket er kuldebroverdier til vinduer og dører oppgitt til å være $0,01 \text{ W}/(\text{mK})$ for løsningen med lite kuldebroer og $0,05 \text{ W}/(\text{mK})$ for løsningen med «normale» kuldebroer. Ved modelleringen av dagens konstruksjon ble kuldebroverdier beregnet til $0,016 \text{ W}/(\text{mK})$ for reell vindusinnsetting på Campus Ås, mens reell vindusinnsetting på Sørhellinga ble beregnet til $0,037 \text{ W}/(\text{mK})$. Både Campus Ås og Sørhellinga er næringsbygg og må tilfredsstillende kravet til normalisert kuldebroverdi på $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Kuldebroverdiene ved vindusinnsetting på Campus Ås og Sørhellinga er begge lavere enn kuldebroverdier for «normale» kuldebroer. Hvis det antas at alle andre kuldebroer i bygningene er på samme nivå som «normale» kuldebroer, kan det antas at kravet på normalisert kuldebroverdi er oppfylt for Campus Ås og Sørhellinga. Campus Ås kan trolig også oppnå kravet til småhus på $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Nøyaktig beregning av alle kuldebroer i et bygg er rimelig omfattende. Det er mange faktorer som spiller inn. Det fremstår derfor noe tungvint å kontrollere kravet om normalisert kuldebroverdi. I praksis vil en sannsynlig bruke standardiserte verdier fra bibliotek. En kontroll vil trolig basere seg på mange antagelser og vil vise at påregnelig normalisert kuldebroverdi er innenfor kravet. Det gjør det enkelt å oppnå kravet til normalisert kuldebroverdi. Kanskje det burde være en annen måte å kontrollere varmetapet fra kuldebroer på enn ved normalisert kuldebroverdi.

5.6 Beregning av U-verdi og kuldebroverdier

Når kuldebroverdier skulle beregnes var det vanskelig å tolke hvilke arealer som tilhører ulike bygningsdeler. Det vil si vindu og vegg, og hvordan hver bygningsdel skal beregnes ved numerisk beregning av kuldebro ved vindusinnsetting. Det er forøvrig forskjellig definisjon av arealer i Norge og andre Europeiske land over hvilke arealer som tas med i beregningen av kuldebroverdi. Bakgrunnen til uklarheten i hvilke arealer som skal inkluderes i kuldebroberegningen, kan ligge i definisjonen til begrepet kuldebro. I følge NS-EN ISO 10211:2017 er «En kuldebro en del av en bygning hvor den ellers ensartede termiske motstanden er signifikant forandret ved fullstendig eller delvis gjennomtrengende bygningsdel med materialer med forskjellig termisk ledningsevne og/ellers endring i tykkelse av materialet og/eller forskjell mellom innvendig og utvendige overflater som for eksempel for vegg- / gulv- / takoverganger». I denne definisjonen av kuldebro er det ingen klar geometrisk avgrensning på kuldebro, og kanskje det er derfor det oppleves noe uklart ved beregning av kuldebro.

Det er først og fremst definisjonen på hvordan U-verdi for vegg beregnes i kuldebroberegningen som er uklart. Det vil si hvilke areal som inngår i veggarealet ved numerisk beregning av kuldebro. I en prosjektrapport fra SINTEF Byggforsk står det at mellomrommet mellom karm og losholt/stendere skal inkluderes i veggens areal (SINTEF Byggforsk, 2008), og senere i kapittelet står det også at U-verdien til veggen regnes uten fugemasse, bunnfyllingslist etc. Denne beskrivelsen fremstår noe misvisende hvor det i det ene tilfellet står at monteringsfugen ved vindusinnsetting skal inkluderes i veggens areal, men etterpå ikke. Forfatteren av denne oppgaven har tolket beskrivelsen over til at det meste riktige ved numerisk beregning av kuldebro vil være å regne U-verdien til veggen som det er beskrevet i det siste utsagnet, uten monteringsfugen. I beregningene gjort i oppgaven er derfor veggarealet regnet opp til losholt uten at monteringsfugen er inkludert. I tillegg er det for prosjekt Campus Ås lagt inn ekstra trematerial i modelleringen av veggen for å få opp prosentandelen tre i veggen til det som er oppgitt fra leverandøren. Monteringsfugen er bare inkludert i U-verdiberegning av vindusinnsetting. Lengden på vindusinnsetting er da summen av høyden på avgrenset veggutsnitt opp til losholt, høyden på monteringsfuge og høyden på avgrenset vindusutsnitt. På den måten regnes det ekstra varmetapet som oppstår på grunn av kuldebro først og fremst som en fugeegenskap, mens varmestrømmen i realiteten også går utenom fugen.

Årsaken til at det i det første utsagnet står at monteringsfugen skal inkluderes i veggens areal, kan komme av at arealet til vinduet strekker seg til og med vinduskarmen. Derfor vil det være naturlig at resten av konstruksjonen, inkludert monteringsfugen tilhører arealet til veggen. Det er slik arealene for vindu og vegg avgrenses ved energiberegning. I tillegg er vinduer oppgitt i modulmål fra produsent. Det vil si at hvis vinduet for eksempel er oppgitt til å være 1,2 x 1,2 m, er egentlig vinduet mindre for å få plass til både vinduet og monteringsfugen i utsparingen i vegg som er 1,2 m x 1,2 m. Av den grunn skulle man nesten tro at monteringsfugen burde inkluderes i vinduet sitt areal, men dette ville vært vanskelig å ta hensyn til når monteringsfuger er utformet forskjellig fra bygg til bygg. Det fremkommer rart at veggareal for numerisk beregningen av kuldebroer og energiberegning defineres forskjellig. Det vil ikke være riktig å kunne sammenlikne kuldebroverdier med andre energiberegninger hvis samme arealer er definert forskjellig ved ulike beregninger.

Som sagt er det forskjellige referansemål på U-verdier og kuldebroverdier i Norge og utlandet. I Norge måler vi lengden av en konstruksjon fra innsiden, mens i andre europeiske land måles lengden i midten eller fra yttersiden av konstruksjonen. Det er derfor viktig å være oppmerksom på at litteratur fra utlandet, informasjon fra utenlandske leverandører om sine produkter og beregninger som er gjort fra konsulenter i utlandet ikke kan sammenliknes uten å endre referansemål i beregningene (Bjørnulf & Bryn, 2017). Ved beregning av kuldebroverdier i et numerisk program er det ikke bare arealer som defineres forskjellig fra Norge. I Tyskland regnes for eksempel U-verdien til veggen gjennom et vilkårlig punkt i veggen ved numeriske beregninger av kuldebroer, men i Norge tar man utgangspunkt i gjennomsnittsverdien gjennom hele den modulerte veggkonstruksjonen. Grunnen til at utgangspunktet for beregning av kuldebroer er så forskjellig fra Norge og Tyskland ligger blant annet i at det er ulike byggekulturer mellom landene. I Tyskland bygges det i mer betong og mur enn i Norge. Det gjør at veggens oppbygning er mer homogen. I Norge består ofte bæresystemet i bygninger av bindingsverk i tre eller stål. Det gjør at veggen ikke er like homogen i materialsjiktet. Når U-verdien til vegg skal beregnes i Norge, finner en prosentandel stenderverk i veggen og inkluderer dette i U-verdien til veggen.

Det kan konkluderes med at beregning av kuldebroer ved vindusinnsetting ikke fremstår helt entydig. Likevel er det viktigste ved varmestrømsberegninger å vite hva enhver U-verdi og kuldebroverdi inkluderer av arealer og forutsetninger for kunne sammenlikne med andre verdier. Dette for å sikre at energiberegning av konstruksjoner ikke overlapper hverandre og for å gi grunnlag for sammenlikning av standard.

6 KONKLUSJON

Resultatene fra feltarbeidet med temperaturmålinger og termografering viser at metodene kan avdekke kuldebroer ved vindusinnsetting. Temperaturmålingen forteller mest om hvordan kuldebroeffekten ved vindusinnsetting er sammenliknet med termografering. Nøyaktig kuldebroverdi er ikke mulig å fastslå ved temperaturmåling, men det gir en indikasjon på grad av kuldebroeffekt. Det er mulig å verifisere beregnede kuldebroverdier fra modellering med temperaturmålinger på en tilsynelatende god måte.

Termogrammene viser at det er kuldebro ved vindusinnsetting, men det er spesielt stor usikkerhet ved termogrammene siden vinduer reflekterer mye varmestråling. Det er mange faktorer som kan påvirke et termogram, så man kan ikke ta konklusjoner basert på dem. Termogram gir en visuell bekreftelse på kuldebroer og forskjeller i overflatetemperatur på vindusinnsetting. Temperaturforskjellene som kommer frem av termogrammet viser seg å være rimelig korrekte, men nøyaktig temperatur på overflatene er ikke mulig å fastslå med varmekamera. Det betyr at et termogram bare kan forsterke resultatet av en allerede målt overflatetemperatur.

Vinduets plassering i vegglivet har stor innvirkning på kuldebroeffekten i en bygning. Det viser resultatene fra prosjekt Campus Ås og Sørhellinga som er studert i oppgaven. Campus Ås har en betydelig bedre konstruksjon av vegg, vindu og vindusinnsetting, sammenliknet med Sørhellinga. En forholdsvis midtstilt vindusposisjon i vegglivet viser seg å være den beste plasseringen av vinduet med tanke på å minimere kuldebro uavhengig av konstruksjonsoppbygning. En helt uttrukket eller inntrukket vindusinnsetting vil begge gi høyere kuldebroverdier. Det tyder på at vinduer i aluminium oppfører seg på samme måte som trevinduer.

De ulike tiltakene med etterisolering av innside ramme- og karmprofil og vegg som ble utført ved modellering, påvirker kuldebroverdien. Etterisolering av innside vindusprofil reduserer kuldebroverdi stort sett ved alle typer vindusinnsettinger. Det negative med etterisolering av innside vindusprofil er økt fare for fukt i området rundt karmprofil og glass. Etterisolering av vegg øker kuldebroverdi ved de fleste vindusposisjoner. Likevel kan det totale varmetapet fra en bygning kunne reduseres ved etterisolering av vegg selv om kuldebroeffekten øker.

Alt i alt vil ulike plasseringer av vindu i vegglivet fremstå stort sett som et kompromiss mellom varmetekniske- og fukttekniske hensyn. Ved å plassere vinduet langt ut i vegglivet vil

det bli lettere å regntette og lufttette, men det gir en økt kuldebro. En plassering mer midt i vegglivet vil gi en motsatt effekt med vanskeligere tetting og en mindre kuldebro. Den mest optimale plasseringen av vindu med tanke på energieffektivitet er å plassere vinduet mot midten av vegglivet. Det ligger likevel et forbehold om en god montasje av vinduet med tanke på fukt for at plasseringen skal være gunstig for byggets energiregnskap over tid.

7 FORSLAG TIL FORBEDRING OG VIDERE ARBEID

Tidsrammen på studien satte noen begrensninger for oppgaven. Jobben med å finne og få tilgang til bygninger til å gjennomføre feltarbeidet når måleutstyr var tilgjengelig, samt å oppdrive tegningsgrunnlaget til modelleringen tok mye tid. For å få brukbare resultater fra feltarbeidet, var feltarbeidet avhengig av gjennomføring mens det fortsatt var rimelig kaldt ute. Det burde være en temperaturforskjell på mer enn 10 °C mellom inne og utetemperatur. Det var utfordrende å finne en tid i vinter hvor det var kaldt over en lenger periode.

Planleggingen og utførelsen av feltarbeidet måtte gjøres på forholdvis kort tid.

Resultatet i oppgaven er basert på feltarbeid og modellering fra to ulike bygninger. Den ene var en byggeplass, den andre et undervisningsrom i bruk, ingen av stedene var optimale sammenliknet med en laboratoriesituasjon. Hvis flere prosjekter med ulike veggkonstruksjoner, vinduer og vindusinnsetninger hadde blitt studert, ville forskningen blitt forsterket. Det kan tenkes at det hadde vært mulig å komme frem til en mer presis vindusinnsetting som er mer optimal for å minimere kuldebro.

Flere målepunkter og lenger måletid ville forsterket feltarbeidet og grunnlaget for modellering. Som nevnt i diskusjonen var noen målepunkter mer gunstige enn andre. Erfaringen viser at plassering av noen målepunkter ville blitt gjort annerledes om feltarbeidet skulle være gjennomført igjen. Flere målinger på samme konstruksjon og en lenger måletid per bygg ville styrket resultatet. Varmeflukssensorer ble testet på det ene prosjektet, men resultatet fra dem ble valgt å ikke benytte grunnet ugunstig plassering av dem. En ny plassering av varmekuldebroene kan gi ny informasjon om varmegjennomgang ved vindusinnsetting. Dette kunne vært interessant for oppgaven.

Måleutstyret som er brukt i feltarbeider har en viss usikkerhet ved nøyaktigheten. For å bevise at feilmarginene på måleutstyret er som produktdatabladene angir, burde måleutstyret vært kalibrert før feltarbeidet ble satt i gang. Det kunne vært gjennomført ved å legge temperatursensorene i isvann som holder en temperatur på 0 °C. Temperaturforskjell mellom målt verdi og 0 °C vil indikere feilmarginen på måleapparatet.

I videre arbeid hadde det vært interessant å studere om etterisolering av vegg vil være gunstig for å minimere varmetapet fra en bygning. En tykkere vegg med mer varmeisolasjon vil kunne øke kuldebroeffekten og kunne gi et økt varmetap. Ved å sammenlikne energiregnskap og kostander ved tiltaket, kan det være mulig å avgjøre om det vil være en fordel å etterisolere

veggen eller ikke. For studie av energiregnskap burde en slik studie være knyttet til målinger av et bygg før og etter rehabilitering, noe som tidsmessig nok er langt utenfor en masteroppgave.

Oppgaven ble gjennomført med bruk av programvare fra Schüco og veiledning fra dem. Det er svært nyttig å ha veileder som kan beregningsprogrammet og kjenner problemstillingene. På den andre siden kunne det også vært lurt å bruke programmet THERM, fordi programmet er mye brukt i forskning og en finner mange flere publikasjoner der dette programmet er benyttet.

I denne studien er det fokusert på å finne målepunkter som representerer antatt kaldeste del av kuldebro ved vindusinnsetting egnet for modellering i 2-d. Vinduer har også hjørner, noe som her ikke er diskutert. I en hot-box får en et totalresultat av et vindu som en flate med alle konstruksjonselementer. Slike sammenligninger burde vært modellert i 3-d.

REFERANSER

- Bjørnulf, A. & Bryn, I. (2017). *Glass i fasader og kuldebroer*. Fasader i glass som holder hva vi lover.
- Byggdetaljer 471.010. (2003). Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer *Byggforskserien*: 8.
- Byggdetaljer 471.015. (2008). Kuldebroer, Konsekvenser og dokumentasjon av energibehov *Byggforskserien*: 8.
- Byggdetaljer 471.016. (1999). Kuldebroer, Metoder for å bestemme kuldebroverdi *Byggforskserien*: 6.
- Byggdetaljer 474.642. (2014). Termografering av bygninger *Byggforskserien*: 8.
- Byggdetaljer 523.701. (2018). Innsetting av vindu i vegger av bindingsverk. *Byggforskserien*: 18.
- Byggdetaljer 533.151. (2016). Vinduer i aluminium *Byggforskserien*: 5.
- Byggdetaljer 571.953. (2016). Isolerruter, Typer og konstruksjoner *Byggforskserien*: 5.
- Byggdetaljer 571.954. (2016). Isolerruter, Lys og varmetekniske egenskaper *Byggforskserien*: 10.
- Byggdetaljer 720.015(Utgått). (1999). Utbedring av kuldebroer *Byggforskserien*: 7.
- Byggdetaljer 471.008. (2018). Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946 *Byggforskserien*: 16.
- Byggteknisk forskrift. (2017a). § 14-2. *Krav til energieffektivitet*. I: Direktoratet for byggkvalitet (red.). Byggteknisk forskrift (TEK17). Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-2/>.
- Byggteknisk forskrift. (2017b). § 14-3. *Minimumskrav til energieffektivitet*. I: Direktoratet for byggkvalitet (red.). Byggteknisk forskrift (TEK17). Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-3/>.
- Clas Ohlson. (2019). Temperatur- og fuktighetslogg med USB.
- Dalland, O. (2012). *Metode og oppgaveskriving*. 5. utg.: Gyldendal akademisk.
- Decheva, L. M. (2012). *Vinduer for energieffektive bygninger Kuldebroer ved vindusinnsetting*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. Ø. (2014). *Trehus*. Håndbok 5. Oslo: SINTEF akademiske forlag.
- Fabel arkitekter & Henning Larsen Architects. (2015). *Campus Ås SLP 154 Plan 02 Plan tett bygg*: Statsbygg.
- Hukseflux Thermal Sensors. (2015). *User Manual TRSYS01*. Tilgjengelig fra: https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/TRSYS01_manual_v1721_0.pdf.
- MazeMap. (2019). *NMBU* Tilgjengelig fra: <https://use.mazemap.com>.

- Moelven. (2016). U-verdier for Iso3-vegger
- NS-EN 13187:1998. (1998). *Bygningers termiske egenskaper Kvantativ metode for å oppdage termiske uregelmessigheter i bygningers klimaskjerm Infrarød metode (ISO 6781:1983 modifisert)*: Standard Norge.
- NS-EN ISO 6946:2017. (2017). *Bygningerskomponenter og -elementer Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient Beregningsmetoder*: Standard Norge.
- NS-EN ISO 10077-2:2017. (2017). *Termiske egenskaper til vinduer, dører og skodder Beregning av varmegjennomgangskoeffisient Del 2: Numerisk metode for karm og ramme (ISO 10077-2:2017)*: Standard Norge.
- NS-EN ISO 10211:2017. (2017). *Kuldebroer i bygningskonstruksjoner Varmestrømmer og overflatetemperaturer Detaljerte beregninger*: Standard Norge,.
- NS-EN ISO 14683:2017. (2017). *Kuldebroer i bygningskonstruksjoner Lineær varmegjennomgangskoeffisient Forenklete metoder og normalverdier. :* Standard Norge.
- Planforum Arkitekter AS. (2008). *Sørhelling NMBU i Ås*: Planforum Arkitekter AS. Tilgjengelig fra: <https://www.planforum.no/srhellinga-nmbu-i-s>.
- SINTEF Byggforsk. (2008). *Kuldebroer - Bergning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*. I: Byggforsk, S. (red.). Prosjektrapport 25. Oslo.
- SINTEF Byggforsk. (2009). *Moderne trevinduer - funksjonalitet, levetid og design*. I: Byggforsk, S. (red.). Prosjektrapport 46. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- SINTEF Byggforsk. (2012). *Energieffektive bevaringsverdige vinduer*.
- SN/TS 3031:2016. (2016). *Bygningers energiytelser Beregning av energibehov og energiforsyning*: Standard Norge.
- Sommer-Informatik. (2019). *WINISO*. Tilgjengelig fra: <https://www.sommer-informatik.com/winiso/index.php/en/>
- Statsbygg. (2017). *Campus Ås, samlokalisering*. www.statsbygg.no. Tilgjengelig fra: <https://www.statsbygg.no/prosjekter-og-eiendommer/byggeprosjekter/campus-as/>.
- Store norske leksikon. (2014). *termoelement*: Jakob Sandstad Tilgjengelig fra: <https://snl.no/termoelement>.
- Store norske leksikon. (2018). *aluminium*: Bjørn Pedersen. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/aluminium>.
- Venta Windows. (2017). U value listing - Short format.

VEDLEGG

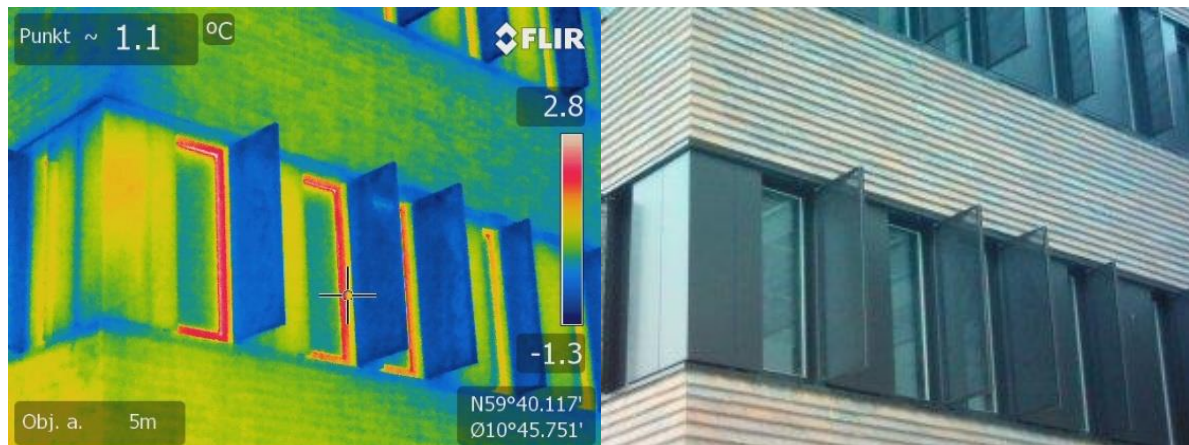
A Termogrammer

B Modeller av ettilisering av innside vegg og karm- og rammeprofil

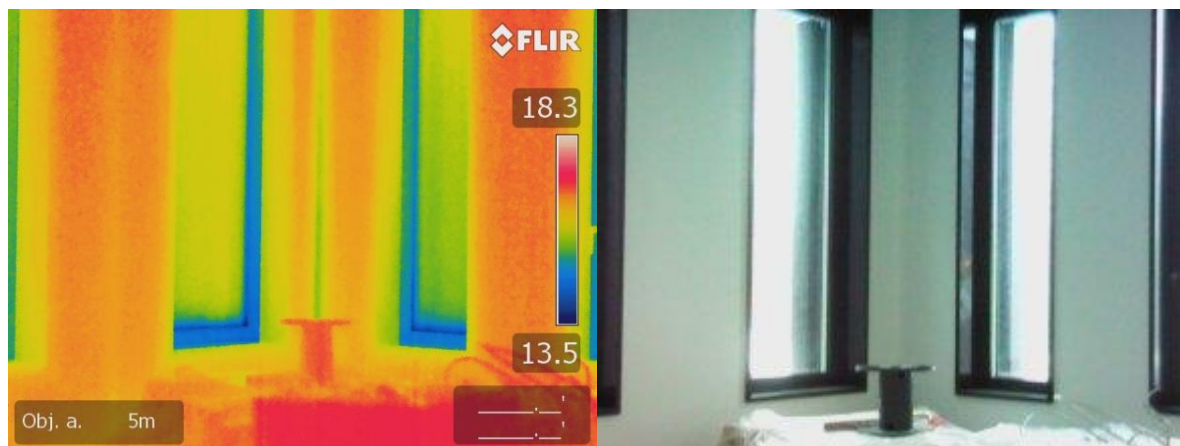
C Beregning av kuldebroverdi

D Varmestrømsberegninger

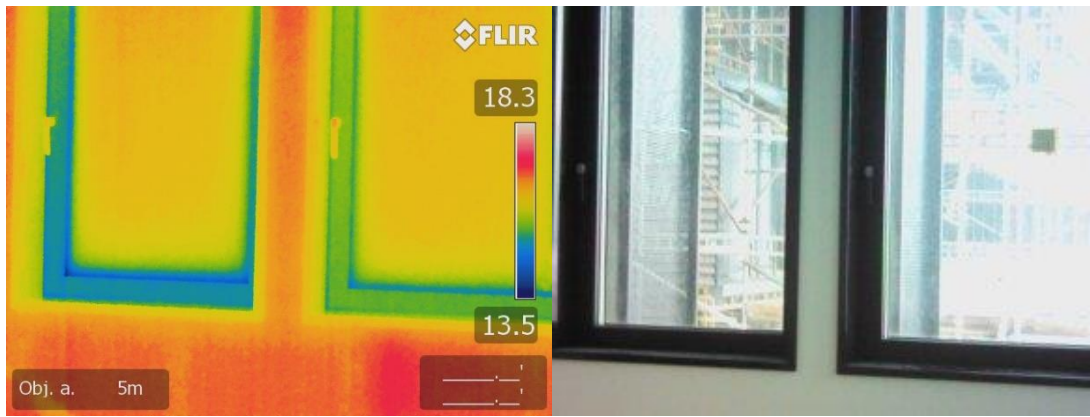
A Termogrammer



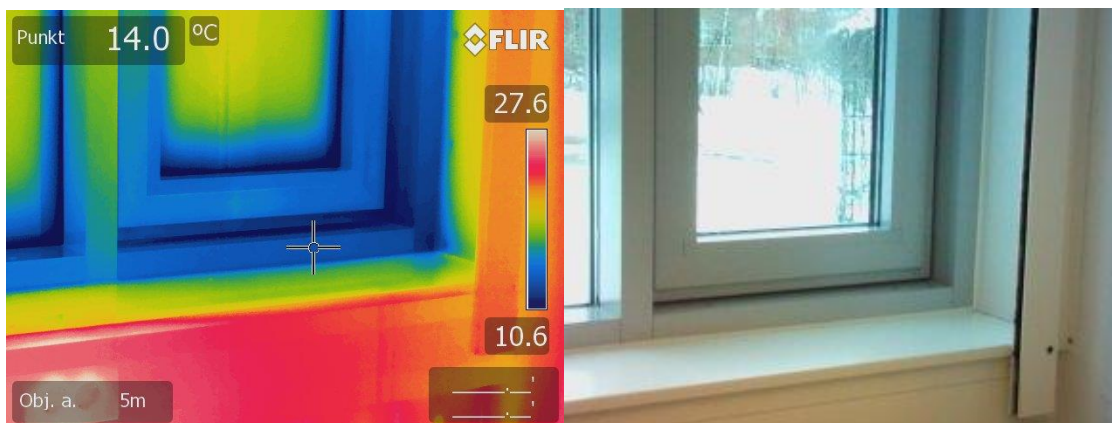
Figur 36 Termogram og fotografi av utvendig fasade på Campus Ås. De anvendte vinduene under måling er vindu to og tre til høyre for hjørne. Det kommer tydelig frem fra termogrammet at vindusinnsettingen utgjør et ekstra varmetap for bygningen.



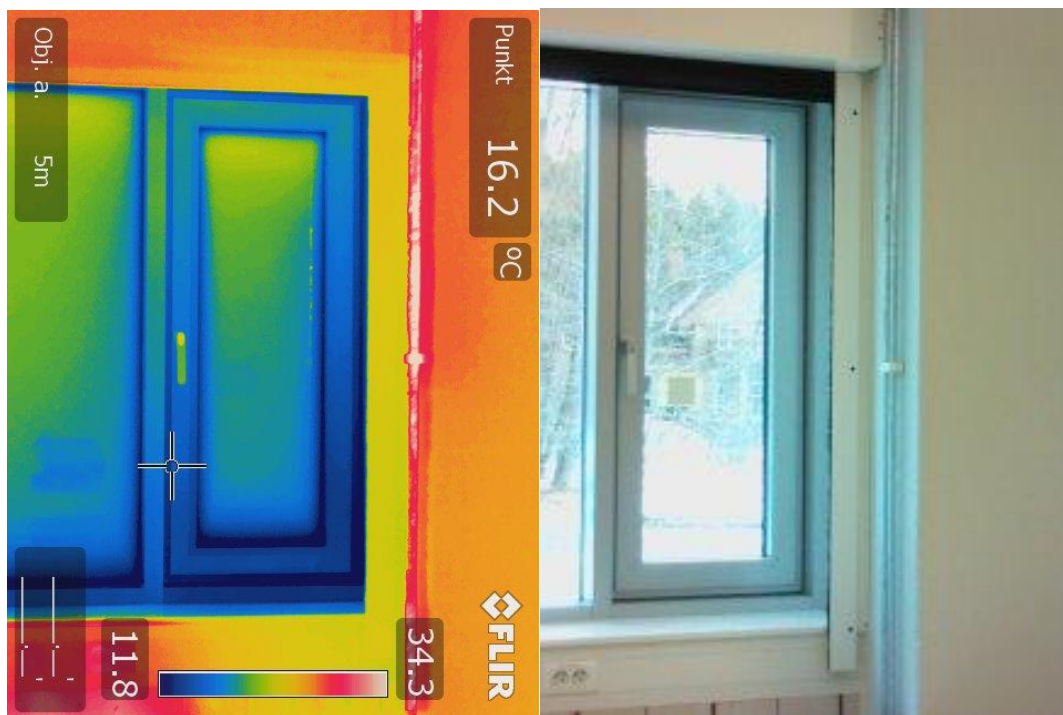
Figur 37 Termogram og fotografi av innvendig kontorhjørne tatt 15.02.19 på Campus Ås. Temperaturen innerst i hjørnet er lavere enn resten av veggene. Det kan komme av at luften står mer stille i hjørnet og at det er en geometrisk kuldebro i hjørner på grunn av utvendig og innvendig areal har forskjellig størrelse.



Figur 38 Termogram og fotografi av nedre del av vinduene brukt under feltarbeidet tatt 15.02.19 på Campus Ås. Termogrammet viser at karmprofilen til det høyre vinduet sett innenfra er noe varmere enn den venstre karmprofilen.

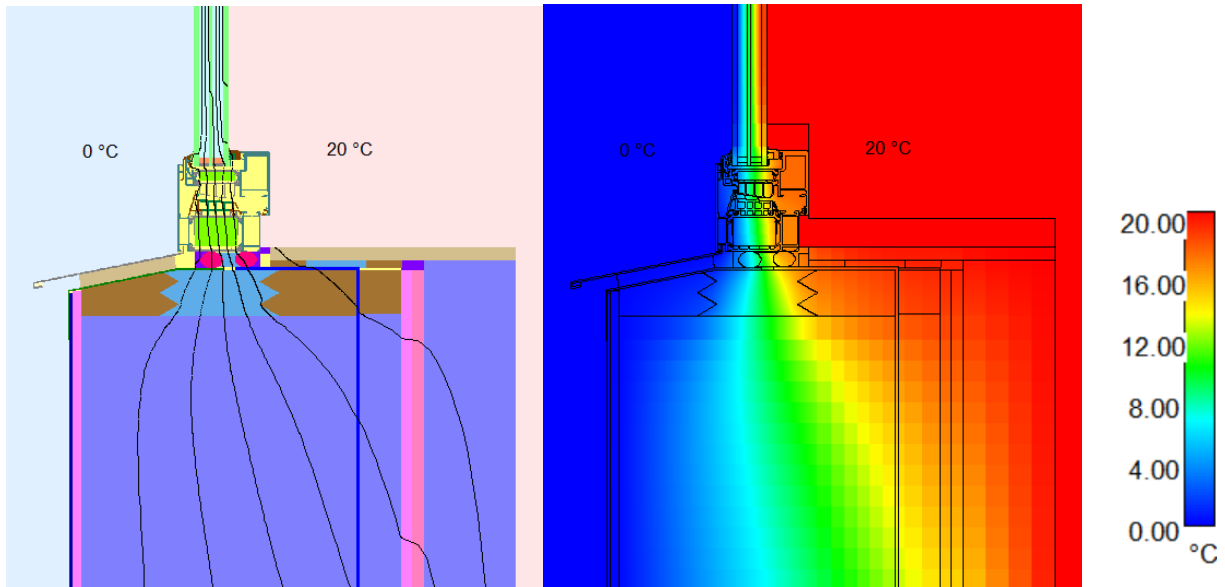


Figur 39 Termogram og fotografi av nedre del av vinduet brukt under feltarbeidet tatt 12.03.19 på Sørhellinga. Punktet i bilde viser at temperaturen på bunnfasadeelementet er på 14,0 °C.

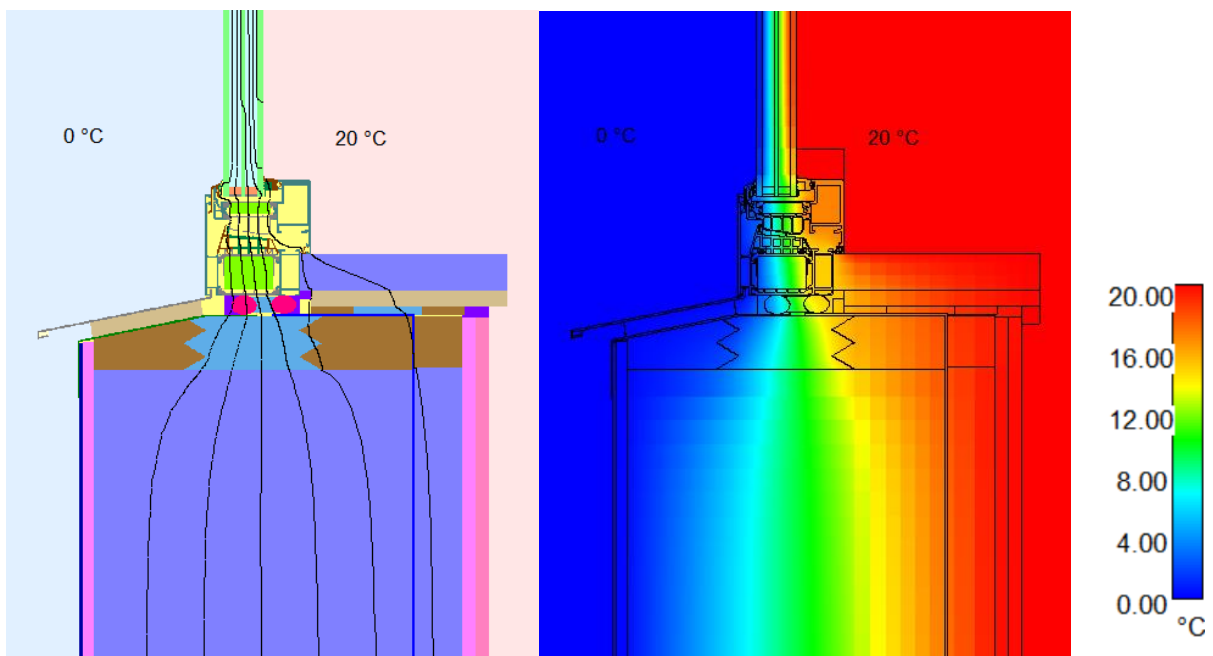


Figur 40 Termogram og fotografi av vindu brukt under feltarbeid tatt 12.03.19 på Sørhellinga. Termogrammet viser at punktet på sidekarmen har en temperatur på 16,2 °C.

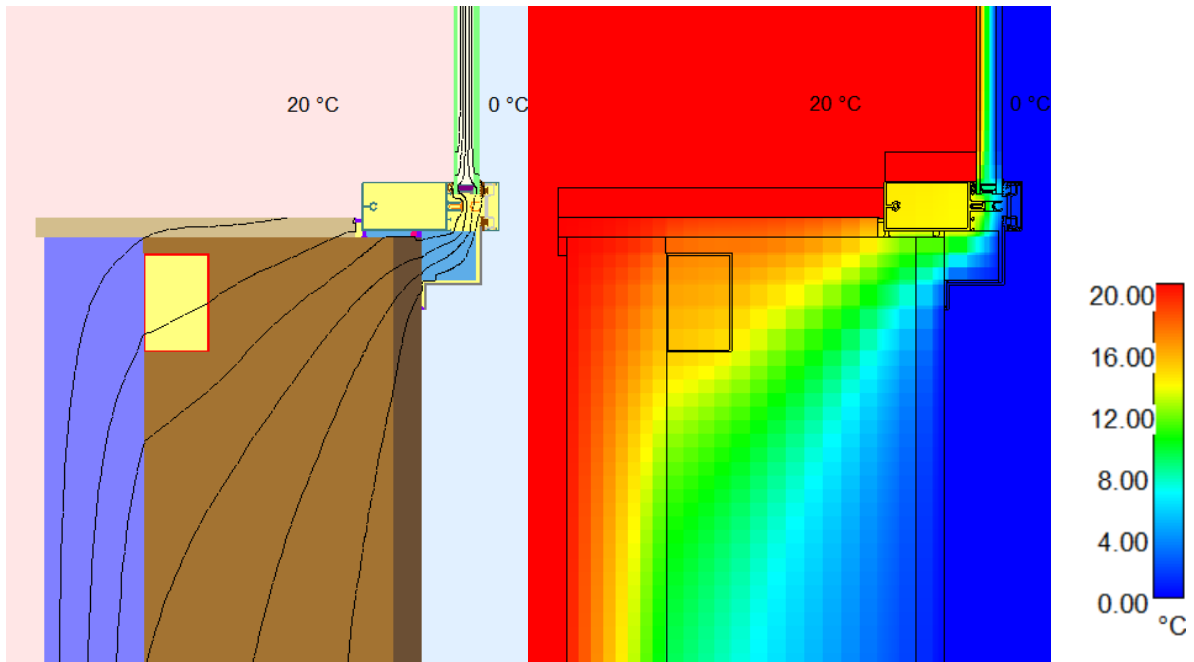
B Modeller av etterisolering av innside vegg og karm- og rammeprofil



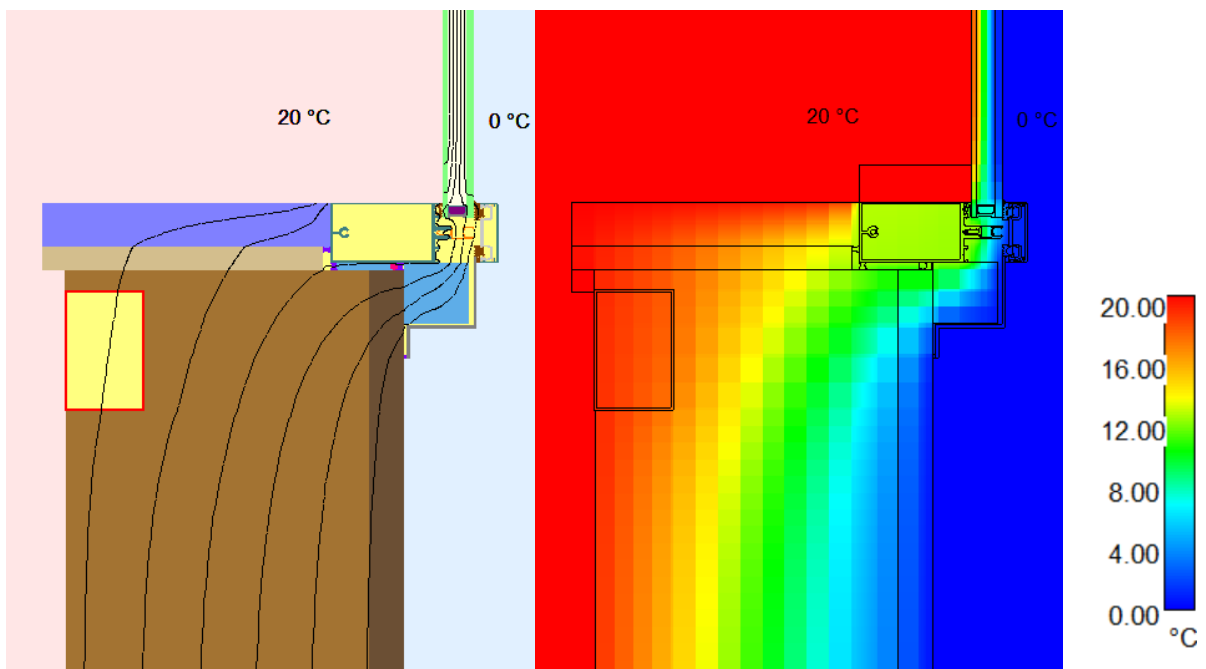
Figur 41 To presentasjoner av (reell) midtstilt vindusinnsetting med innside etterisolering av vegg på Campus Ås. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.



Figur 42 To presentasjoner av (reell) midtstilt vindusinnsetting med innside etterisolering av karm på Campus Ås. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.



Figur 43 To presentasjoner av (reell) uttrukket vindusinnsetting med innside etterisolering av vegg på Sørhellinga. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.



Figur 44 To presentasjoner av (reell) uttrukket vindusinnsetting med innside etterisolering av fasadelement på Sørhellinga. Den venstre delen av figuren viser materialer og isotermer med svarte streker, mens den høyre delen av figuren viser isotermer med ulike farger. Avstanden mellom isotermene illustrert som svarte streker er 3 °C.

C Beregning av kuldebroverdi

Beregnete kuldebroverdier gjort i regneark i Excel ut fra simulerte varmestrømsberegninger fra WinIso2D for henholdsvis Campus Ås og Sørhellinga.

Kuldebroverdien er beregnet etter formelen: $\Psi = L_1^{2D} - L_2^{2D} - L_3^{2D}$

Resultater modellering Campus Ås												
Dagens konstruksjon												
Plassering		Vindusinnsetting			Vegg			Vindu			Kuldebroverdi	
Pl	Avstand fra utside vindspere b [mm]	U_1 [W/(m ² K)]	l_1 [m]	L_1^{2D} [W/(mK)]	U_2 [W/(m ² K)]	l_2 [m]	L_2^{2D} [W/(mK)]	U_3 [W/(m ² K)]	l_3 [m]	L_3^{2D} [W/(mK)]	Ψ [W/(mK)]	
Pl	118	0.356	1.319	0.470	0.157	1.000	0.157	0.992	0.299	0.297	0.016	
Midstilh - reell	223	0.373	1.319	0.492	0.157	1.000	0.157	0.992	0.299	0.297	0.038	
Inntrukket	13	0.372	1.319	0.491	0.157	1.000	0.157	0.992	0.299	0.297	0.037	
Utrtrukket												
Eterisolering av innside vegg 10 cm												
Plassering		Vindusinnsetting			Vegg			Vindu			Kuldebroverdi	
Pl	Avstand fra utside vindspere b [mm]	U_1 [W/(m ² K)]	l_1 [m]	L_1^{2D} [W/(mK)]	U_2 [W/(m ² K)]	l_2 [m]	L_2^{2D} [W/(mK)]	U_3 [W/(m ² K)]	l_3 [m]	L_3^{2D} [W/(mK)]	Ψ [W/(mK)]	
Pl	118	0.321	1.319	0.423	0.109	1.000	0.109	0.992	0.299	0.297	0.018	
Midstilh - reell	223	0.332	1.319	0.438	0.109	1.000	0.109	0.992	0.299	0.297	0.032	
Inntrukket	13	0.341	1.319	0.450	0.109	1.000	0.109	0.992	0.299	0.297	0.044	
Utrtrukket												
Eterisolering av innside karm												
Plassering		Vindusinnsetting			Vegg			Vindu			Kuldebroverdi	
Pl	Avstand fra utside vindspere b [mm]	U_1 [W/(m ² K)]	l_1 [m]	L_1^{2D} [W/(mK)]	U_2 [W/(m ² K)]	l_2 [m]	L_2^{2D} [W/(mK)]	U_3 [W/(m ² K)]	l_3 [m]	L_3^{2D} [W/(mK)]	Ψ [W/(mK)]	
Pl	118	0.346	1.319	0.456	0.157	1.000	0.157	0.959	0.299	0.287	0.013	
Midstilh - reell	223	0.365	1.319	0.481	0.157	1.000	0.157	0.959	0.299	0.287	0.038	
Inntrukket	13	0.356	1.319	0.470	0.157	1.000	0.157	0.959	0.299	0.287	0.026	
Utrtrukket												
Målte grensebetingelser, temp.differanse på 13,9 °C												
Plassering		Vindusinnsetting			Vegg			Vindu			Kuldebroverdi	
Pl	Avstand fra utside vindspere b [mm]	U_1 [W/(m ² K)]	l_1 [m]	L_1^{2D} [W/(mK)]	U_2 [W/(m ² K)]	l_2 [m]	L_2^{2D} [W/(mK)]	U_3 [W/(m ² K)]	l_3 [m]	L_3^{2D} [W/(mK)]	Ψ [W/(mK)]	
Pl	118	0.363	1.319	0.479	0.157	1.000	0.157	1.058	0.299	0.316	0.005	
Midstilh - reell	223	0.380	1.319	0.501	0.157	1.000	0.157	1.058	0.299	0.316	0.028	
Inntrukket	13	0.381	1.319	0.503	0.157	1.000	0.157	1.058	0.299	0.316	0.029	
Utrtrukket												

Resultater modellering Sorbellinga													
Dagens konstruksjon													
Plassering		Vindusinnsetjing				Vegg				Vindu			
Plussing	Avstand fra utside vindspere b [mm]	U_1 [W/(m ² K)]	l_1 [m]	L_1^{2D} [W/(mK)]	U_2 [W/(m ² K)]	l_2 [m]	L_2^{2D} [W/(mK)]	U_3 [W/(m ² K)]	l_3 [m]	L_3^{2D} [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]
Plussing vindusinnsetjing													
Midsitt	84,6	0,720	1,246	0,897	0,426	1,000	0,426	1,868	0,240	0,448	0,448	0,023	0,023
Inntrukket	141,5	0,745	1,246	0,928	0,426	1,000	0,426	1,868	0,240	0,448	0,448	0,054	0,054
Uttrukket - reell	-78	0,731	1,246	0,911	0,426	1,000	0,426	1,868	0,240	0,448	0,448	0,037	0,037
Etterisolering av innside vegg 10 cm													
Plassering		Vindusinnsetjing				Vegg				Vindu			
Plussing vindusinnsetjing	Avstand fra utside vindspere b [mm]	U_1 [W/(m ² K)]	l_1 [m]	L_1^{2D} [W/(mK)]	U_2 [W/(m ² K)]	l_2 [m]	L_2^{2D} [W/(mK)]	U_3 [W/(m ² K)]	l_3 [m]	L_3^{2D} [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]
Midsitt	84,6	0,545	1,246	0,679	0,181	1,000	0,181	1,868	0,240	0,448	0,448	0,050	0,050
Inntrukket	141,5	0,543	1,246	0,677	0,181	1,000	0,181	1,868	0,240	0,448	0,448	0,047	0,047
Uttrukket - reell	-78	0,579	1,246	0,721	0,181	1,000	0,181	1,868	0,240	0,448	0,448	0,092	0,092
Etterisolering av innside karm													
Plassering		Vindusinnsetjing				Vegg				Vindu			
Plussing vindusinnsetjing	Avstand fra utside vindspere b [mm]	U_1 [W/(m ² K)]	l_1 [m]	L_1^{2D} [W/(mK)]	U_2 [W/(m ² K)]	l_2 [m]	L_2^{2D} [W/(mK)]	U_3 [W/(m ² K)]	l_3 [m]	L_3^{2D} [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]
Midsitt	84,6	0,703	1,246	0,876	0,426	1,000	0,426	1,758	0,240	0,422	0,422	0,028	0,028
Inntrukket	141,5	0,745	1,246	0,928	0,426	1,000	0,426	1,868	0,240	0,448	0,448	0,054	0,054
Uttrukket - reell	-78	0,701	1,246	0,873	0,426	1,000	0,426	1,757	0,240	0,422	0,422	0,026	0,026
Målte grensebetingelser, temp.differanse på 20,8 °C													
Plassering		Vindusinnsetjing				Vegg				Vindu			
Plussing vindusinnsetjing	Avstand fra utside vindspere - b [mm]	U_1 [W/(m ² K)]	l_1 [m]	L_1^{2D} [W/(mK)]	U_2 [W/(m ² K)]	l_2 [m]	L_2^{2D} [W/(mK)]	U_3 [W/(m ² K)]	l_3 [m]	L_3^{2D} [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]	ψ [W/(mK)]
Midsitt	84,6	0,745	1,246	0,928	0,426	1,000	0,426	1,950	0,240	0,468	0,468	0,034	0,034
Inntrukket	141,5	0,761	1,246	0,948	0,426	1,000	0,426	1,950	0,240	0,468	0,468	0,054	0,054
Uttrukket - reell	-78	0,759	1,246	0,946	0,426	1,000	0,426	1,950	0,240	0,468	0,468	0,052	0,052

D Varmestrømsberegninger

Utvalget simulerte varmemestrømsberegninger fra WinIso2D med materialbeskrivelser presenteres i dette vedlegget.

1. Varmestrømsberegning for (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Campus Ås.
2. Varmestrømsberegning for vegg for dagens konstruksjon på Campus Ås.
3. Varmestrømsberegning for vindu for dagens konstruksjon på Campus Ås.
4. Varmestrømsberegning for (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Campus Ås.
5. Varmestrømsberegning for vegg for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Campus Ås.
6. Varmestrømsberegning for vindu for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Campus Ås.
7. Varmestrømsberegning for (reell) uttrukket vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Sørhellinga.
8. Varmestrømsberegning for vegg for dagens konstruksjon på Sørhellinga.
9. Varmestrømsberegning for vindu for dagens konstruksjon på Sørhellinga.
10. Varmestrømsberegning for (reell) uttrukket vindusinnsetting for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Sørhellinga.
11. Varmestrømsberegning for vegg for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Sørhellinga.
12. Varmestrømsberegning for vindu for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Sørhellinga.

1 Varmestrømsberegning for (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Campus Ås

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

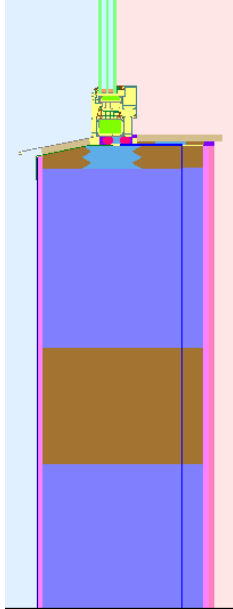
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Campus_Ås\Winiso\Vol2\Normal_grenseb\Vanlig_ferdigstilt_treandel.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 503,00 x 1319,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 397; Y-direction: 386



Boundary conditions:

External:

Temperature Θ_e : 0,00 °C
Surface resistance Rse: 0,040 m²K/W

Internal:

Temperature Θ_i : 20,00 °C
Surface resistance Rsi 1: 0,130 m²K/W
Surface resistance Rsi 2: 0,200 m²K/W

Results:

Temperature difference ΔT : 20,00 K
Total heat flow Q: 9,390 W/m
2D thermal conductance L2D: 0,470 W/mK

Length top/left: 0,00 mm
U-value top/left: 0,000 W/m²K

Length bottom/right: 1319,00 mm
U-value bottom/right: 0,356 W/m²K

Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
**** ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
1 boundary condition inside 0,13, 20°C, 50%	0,130	20,000	6,635	X
1 boundary condition outside 0,04, 0°C, 80%	0,040	0,000	-9,390	X
1 boundary condition inside 0,20, 20°C, 50%	0,200	20,000	2,755	X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles <=2mm)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles, sparse ventilated)				X
Material	L (W/mK)			10077 konform
EPDM	0,250			-
Aluminium (Si-Leg) e=0,9	160,000			-
Polyamid 25% GF	0,300			-
PUR Gießschaum in PASteg 0.033	0,033			-
foam rubber	0,060			-
Float 10077	1,000			-
polysulfide	0,400			-
Kryssfiner	0,130			-
Isolasjon	0,032			-
Trevirke	0,130			-
Fibergips	0,316			-
Spacer Swisspacer SZR 12mm	0,560			-
silicone	0,350			-
Bunnfyllingslist	0,038			-
Gipsplate	0,220			-
Membran	0,067			-
Polyuretanskum	0,026			-
Vindsperre	0,067			-
Dampsperre	0,067			-
Beslag	160,000			-
Gass - gir U-verdi = 0.6 for rute	0,015			-

2 Varmestrømsberegning for vegg for dagens konstruksjon på Campus Ås

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

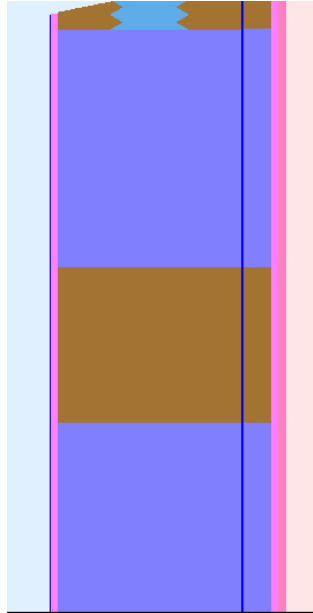
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Campus_Ås\Winiso\Vol2\Normal_grenseb\Bare_vegg_vanlig_ferdigstilt_treandel.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 503,00 x 1000,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 149; Y-direction: 198



Boundary conditions:

External:

Temperature Θ_e : 0,00 °C
Surface resistance R_{se} : 0,040 m²K/W

Internal:

Temperature Θ_i : 20,00 °C
Surface resistance R_{si} 1: 0,130 m²K/W
Surface resistance R_{si} 2: m²K/W

Results:

Temperature difference dT : 20,00 K
Total heat flow Q : 3,143 W/m
2D thermal conductance $L2D$: 0,157 W/mK

Length top/left: 0,00 mm
U-value top/left: 0,000 W/m²K

Length bottom/right: 1000,00 mm
U-value bottom/right: 0,157 W/m²K

Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
****ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
1 boundary condition inside 0,13, 20°C, 50%	0,130	20,000	3,143	X
1 boundary condition outside 0,04, 0°C, 80%	0,040	0,000	-3,143	X
Material	L (W/mK)			10077 konform
Isolasjon	0,032			-
Fibergips	0,316			-
Trevirke	0,130			-
Dampsperre	0,067			-
Gipsplate	0,220			-
Polyuretanskum	0,026			-
Vindsperre	0,067			-

3 Varmestrømsberegning for vindu for dagens konstruksjon på Campus Ås

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

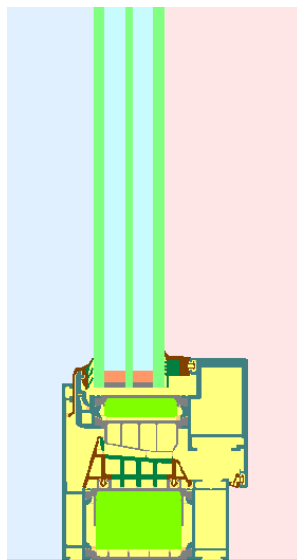
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Campus_Ås\Winiso\Vol2\Normal_grenseb\Bare_vindu_ferdigstilt.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 160,00 x 299,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 194; Y-direction: 294



Boundary conditions:

External:

Temperature Θ_e : 0,00 °C
Surface resistance R_{se} : 0,040 m²K/W

Internal:

Temperature Θ_i : 20,00 °C
Surface resistance R_{si} 1: 0,130 m²K/W
Surface resistance R_{si} 2: 0,200 m²K/W

Results:

Temperature difference ΔT : 20,00 K
Total heat flow Q : 5,930 W/m
2D thermal conductance L_{2D} : 0,296 W/mK

Length top/left: 0,00 mm
U-value top/left: 0,000 W/m²K

Length bottom/right: 299,00 mm
U-value bottom/right: 0,992 W/m²K

Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
ADIABAT	0,000	0,000	0,000	
1 boundary condition inside 0,13, 20°C, 50%	0,130	20,000	4,328	X
1 boundary condition outside 0,04, 0°C, 80%	0,040	0,000	-5,930	X
1 boundary condition inside 0,20, 20°C, 50%	0,200	20,000	1,602	X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles <=2mm)				X
Material	L (W/mK)			10077 konform
EPDM	0,250			-
Aluminium (Si-Leg) e=0,9	160,000			-
Polyamid 25% GF	0,300			-
PUR Gießschaum in PASTeg 0.033	0,033			-
foam rubber	0,060			-
Float 10077	1,000			-
polysulfide	0,400			-
Spacer Swisspacer SZR 12mm	0,560			-
Gass - gir U-verdi = 0.6 for rute	0,015			-

4 Varmestrømsberegning for (reell) midtstilt vindusinnsetting for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Campus Ås

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

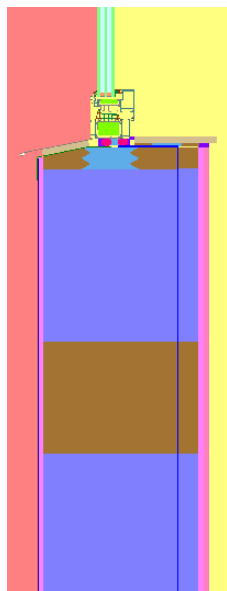
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Campus_Ås\Winiso\Vol2\Endre_grenseb\test_hele.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 503,00 x 1319,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 397; Y-direction: 386



Boundary conditions:

External:

Temperature Θ_e : 2,16 °C
Surface resistance R_{se} : 0,040 m²K/W

Internal:

Temperature Θ_i : 16,10 °C
Surface resistance R_{si} 1: 0,130 m²K/W
Surface resistance R_{si} 2: m²K/W

Results:

Temperature difference dT : 13,94 K
Total heat flow Q : 6,674 W/m
2D thermal conductance L_{2D} : 0,479 W/mK

Length top/left: 0,00 mm
U-value top/left: 0,000 W/m²K

Length bottom/right: 1319,00 mm
U-value bottom/right: 0,363 W/m²K

Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
****ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
Innetemp. CÅ	0,130	16,100	6,674	-
Utetemp. CÅ	0,040	2,160	-6,674	-
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles <=2mm)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles, sparse ventilated)				X
Material	L (W/mK)			10077 konform
EPDM	0,250			-
Aluminium (Si-Leg) e=0,9	160,000			-
Polyamid 25% GF	0,300			-
PUR Gießschaum in PASteg 0.033	0,033			-
foam rubber	0,060			-
Float 10077	1,000			-
polysulfide	0,400			-
Kryssfiner	0,130			-
Isolasjon	0,032			-
Trevirke	0,130			-
Fibergips	0,316			-
Spacer Swisspacer SZR 12mm	0,560			-
silicone	0,350			-
Beslag	160,000			-
Bunnfyllingslist	0,038			-
Dampsperre	0,067			-
Membran	0,067			-
Gipsplate	0,220			-
Polyuretanskum	0,026			-
Vindsperre	0,067			-
Gass - gir U-verdi = 0.6 for rute	0,015			-

5 Varmestrømsberegning for vegg for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Campus Ås

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

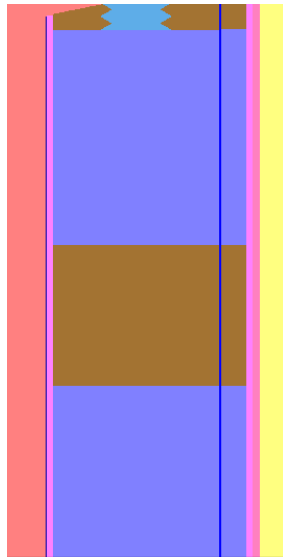
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Campus_Ås\Winiso\Vol2\Endre_grenseb\test_vegg.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 503,00 x 1000,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 149; Y-direction: 198



Boundary conditions:

External:

Temperature Θ_e : 2,16 °C
Surface resistance R_{se} : 0,040 m²K/W

Internal:

Temperature Θ_i : 16,10 °C
Surface resistance R_{si} 1: 0,130 m²K/W
Surface resistance R_{si} 2: m²K/W

Results:

Temperature difference dT : 13,94 K
Total heat flow Q : 2,190 W/m
2D thermal conductance $L2D$: 0,157 W/mK

Length top/left: 0,00 mm
U-value top/left: 0,000 W/m²K

Length bottom/right: 1000,00 mm
U-value bottom/right: 0,157 W/m²K

Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
ADIABAT	0,000	0,000	0,000	-
Innetemp. CÅ	0,130	16,100	2,190	-
Utetemp. CÅ	0,040	2,160	-2,190	-
Material	L (W/mK)			10077 konform
Isolasjon	0,032			-
Fibergips	0,316			-
Trevirke	0,130			-
Dampsperre	0,067			-
Gipsplate	0,220			-
Polyuretanskum	0,026			-
Vindsperre	0,067			-

6 Varmestrømsberegning for vindu for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Campus Ås

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

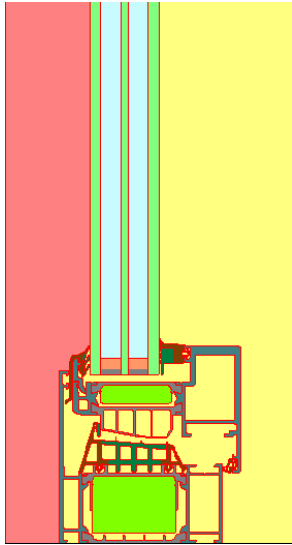
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Campus_Ås\Winiso\Vol2\Endre_grenseb\test_vindu.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 160,00 x 299,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 171; Y-direction: 216



Boundary conditions:			
External:			
Temperature Θ_e :	2,16	°C	
Surface resistance R_{se} :	0,040	m^2K/W	
Internal:			
Temperature Θ_i :	16,10	°C	
Surface resistance R_{si} 1:	0,130	m^2K/W	
Surface resistance R_{si} 2:		m^2K/W	
Results:			
Temperature difference dT :	13,94	K	
Total heat flow Q :	4,411	W/m	
2D thermal conductance $L2D$:	0,316	W/mK	
Length top/left:			
U-value top/left:	0,00	mm	
	0,000	W/m^2K	
Length bottom/right:			
U-value bottom/right:	299,00	mm	
	1,058	W/m^2K	

Materials:

Material	R (m^2K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
****ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
Innetemp. CÅ	0,130	16,100	4,411	-
Utetemp. CÅ	0,040	2,160	-4,411	-
1 air 10077-2 (auto)				-
Material	L (W/mK)			10077 konform
EPDM	0,250			-
Aluminium (Si-Leg) e=0,9	160,000			-
Polyamid 25% GF	0,300			-
PUR Gießschaum in PASteg 0.033	0,033			-
foam rubber	0,060			-
Float 10077	1,000			-
polysulfide	0,400			-
Spacer Swisspacer SZR 12mm	0,560			-
Gass gir U-verdi = 0.6	0,015			-

7 Varmestrømsberegning for (reell) uttrukket vindusinnsetting for dagens konstruksjon på Sørhellinga

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

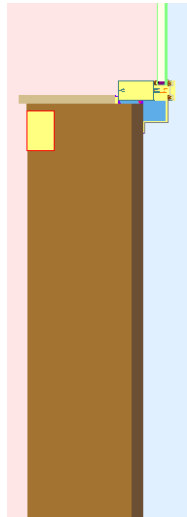
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Sørhellinga\Winiso\Vol2\Ferdig\Sør_vanlig_ferdigstilt.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 436,99 x 1246,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 144; Y-direction: 187



Boundary conditions:

External:

Temperature Θ_e : 0,00 °C
Surface resistance R_{se} : 0,040 m²K/W

Internal:

Temperature Θ_i : 20,00 °C
Surface resistance R_{si} 1: 0,130 m²K/W
Surface resistance R_{si} 2: 0,200 m²K/W

Results:

Temperature difference dT : 20,00 K
Total heat flow Q : 18,205 W/m
2D thermal conductance $L2D$: 0,910 W/mK

Length top/left: 0,00 mm
U-value top/left: 0,000 W/m²K

Length bottom/right: 1246,00 mm
U-value bottom/right: 0,731 W/m²K

Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
**** ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
1 boundary condition inside 0,13, 20°C, 50%	0,130	20,000	11,728	X
1 boundary condition outside 0,04, 0°C, 80%	0,040	0,000	-18,205	X
1 boundary condition inside 0,20, 20°C, 50%	0,200	20,000	6,477	X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles <=2mm)				X
Material	L (W/mK)			10077 konform
EPDM	0,250			-
Aluminium (Si-Leg) e=0,9	160,000			-
Float 10077	1,000			-
polysulfide	0,400			-
Aluminiumlegierung - unbehandelt	160,000			-
Polyvinylchlorid (PVC-U) hart	0,170			-
butyle	0,240			-
Trevirke	0,130			-
Kryssfiner	0,130			-
silicone	0,350			-
Trefiberplate	0,100			-
polyamide (Nylon)	0,250			-
silicagel	0,130			-
Gass gir U-verdi = 1.1 på rute	0,022			-
Beslag	160,000			-
Bunnfyllingslist	0,038			-
Polyuretanskum	0,026			-

8 Varmestrømsberegning for vegg for dagens konstruksjon på Sørhellinga

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

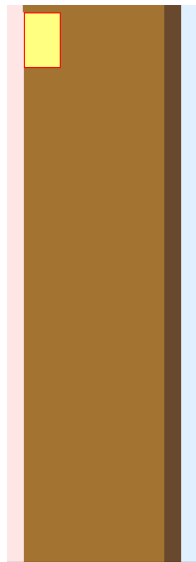
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Sørhellinga\Winiso\Vol2\Ferdig\Sør_bareVegg_ferdigstilt.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 340,50 x 1000,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 30; Y-direction: 75



Boundary conditions:			
External:			
Temperature Θ_e :	0,00	°C	
Surface resistance Rse:	0,040	m ² K/W	
Internal:			
Temperature Θ_i :	20,00	°C	
Surface resistance Rsi 1:	0,130	m ² K/W	
Surface resistance Rsi 2:		m ² K/W	
Results:			
Temperature difference dT:	20,00	K	
Total heat flow Q:	8,521	W/m	
2D thermal conductance L2D:	0,426	W/mK	
Length top/left:			
U-value top/left:	0,000	W/m ² K	
Length bottom/right:			
U-value bottom/right:	0,426	W/m ² K	

Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
****ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
1 boundary condition inside 0,13, 20°C, 50%	0,130	20,000	8,521	X
1 boundary condition outside 0,04, 0°C, 80%	0,040	0,000	-8,521	X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles)				X
Material	L (W/mK)			10077 konform
Trevirke	0,130			-
polyamide (Nylon)	0,250			-
Trefiberplate	0,100			-

9 Varmestrømsberegning for vindu for dagens konstruksjon på Sørhellinga

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

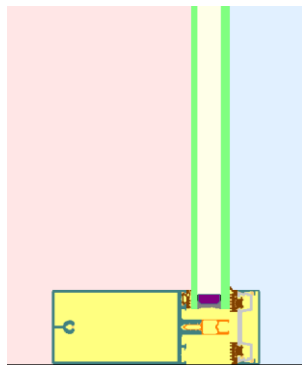
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Sørhellinga\Winiso\Vol2\Ferdig\Sør_bareVindu_ferdigstilt.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 198,99 x 239,99 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 128; Y-direction: 164



Boundary conditions:

External:

Temperature Θ_e : 0,00 °C
Surface resistance R_{se} : 0,040 m²K/W

Internal:

Temperature Θ_i : 20,00 °C
Surface resistance R_{si} 1: 0,130 m²K/W
Surface resistance R_{si} 2: 0,200 m²K/W

Results:

Temperature difference dT : 20,00 K
Total heat flow Q : 8,965 W/m
2D thermal conductance L_{2D} : 0,448 W/mK

Length top/left: 0,00 mm
U-value top/left: 0,000 W/m²K

Length bottom/right: 240,00 mm
U-value bottom/right: 1,868 W/m²K

Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
****ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
1 boundary condition inside 0,13, 20°C, 50%	0,130	20,000	5,711	X
1 boundary condition outside 0,04, 0°C, 80%	0,040	0,000	-8,965	X
1 boundary condition inside 0,20, 20°C, 50%	0,200	20,000	3,254	X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles <=2mm)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles, sparse ventilated)				X
Material	L (W/mK)			10077 konform
Aluminium (Si-Leg) e=0,9	160,000			-
Float 10077	1,000			-
polysulfide	0,400			-
Aluminiumlegierung - unbehandelt	160,000			-
Polyvinylchlorid (PVC-U) hart	0,170			-
butyle	0,240			-
EPDM	0,250			-
silicagel	0,130			-
Gass gir U-verdi = 1.1 på rute	0,022			-

10 Varmestrømsberegning for (reell) uttrukket vindusinnsetting for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Sørhellinga

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

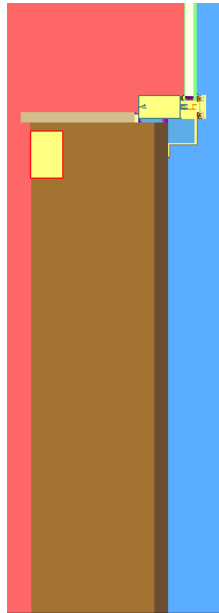
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Sørhellinga\Winiso\Vol2\Endre_grenseb\Sør_vanlig_gb.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 436,99 x 1246,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 144; Y-direction: 187



Boundary conditions:

External:

Temperature Θ_e : 1,55 °C
Surface resistance R_{se} : 0,040 m²K/W

Internal:

Temperature Θ_i : 22,36 °C
Surface resistance R_{si} 1: 0,130 m²K/W
Surface resistance R_{si} 2: m²K/W

Results:

Temperature difference dT : 20,81 K
Total heat flow Q : 19,683 W/m
2D thermal conductance $L2D$: 0,946 W/mK

Length top/left: 0,00 mm
U-value top/left: 0,000 W/m²K

Length bottom/right: 1246,00 mm
U-value bottom/right: 0,759 W/m²K

Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
****ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
Innetemp. Sørhellinga	0,130	22,360	19,683	-
Utetemp. Sørhellinga	0,040	1,550	-19,683	-
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles <=2mm)				X
Material	L (W/mK)			10077 konform
EPDM	0,250			-
Aluminium (Si-Leg) e=0,9	160,000			-
Float 10077	1,000			-
polysulfide	0,400			-
Aluminiumlegiering - unbehandelt	160,000			-
Polyvinylchlorid (PVC-U) hart	0,170			-
butyle	0,240			-
Trevirke	0,130			-
Kryssfiner	0,130			-
silicone	0,350			-
Trefiberplate	0,100			-
polyamide (Nylon)	0,250			-
silicagel	0,130			-
Gass gir U-verdi = 1.1 på rute	0,022			-
Beslag	160,000			-
Bunnfyllingslist	0,038			-
Polyuretanskum	0,026			-

11 Varmestrømsberegning for vegg for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Sørhellinga

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

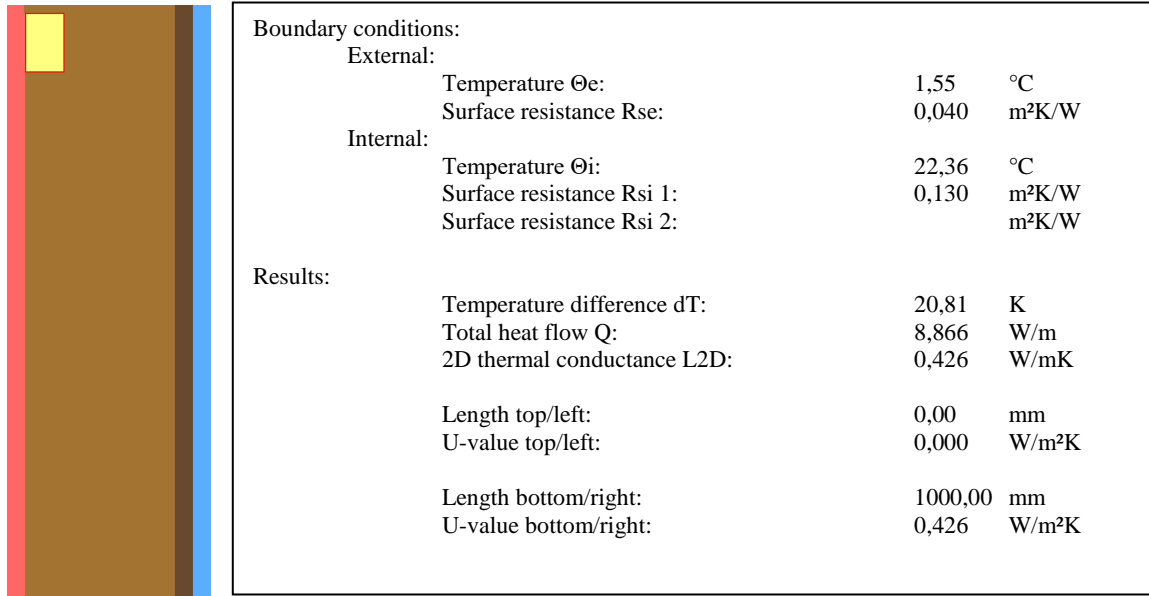
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Sørhellinga\Winiso\Vol2\Endre_grenseb\Sør_barevegg_gb.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 340,50 x 1000,00 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 30; Y-direction: 75



Materials:

Material	R (m^2K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
****ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
1 boundary condition inside 0,13, 20°C, 50%	0,130	20,000	0,000	X
1 boundary condition outside 0,04, 0°C, 80%	0,040	0,000	0,000	X
Innetemp. Sørhellinga	0,130	22,360	8,866	-
Utetemp. Sørhellinga	0,040	1,550	-8,866	-
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles)				X
Material	L (W/mK)	10077 konform		
Trevirke	0,130			-
polyamide (Nylon)	0,250			-
Trefiberplate	0,100			-

12 Varmestrømsberegning for vindu for dagens konstruksjon med målte grensebetingelser på Sørhellinga

Simulation software: WinIso2D 7.74

Date: 24.04.2019

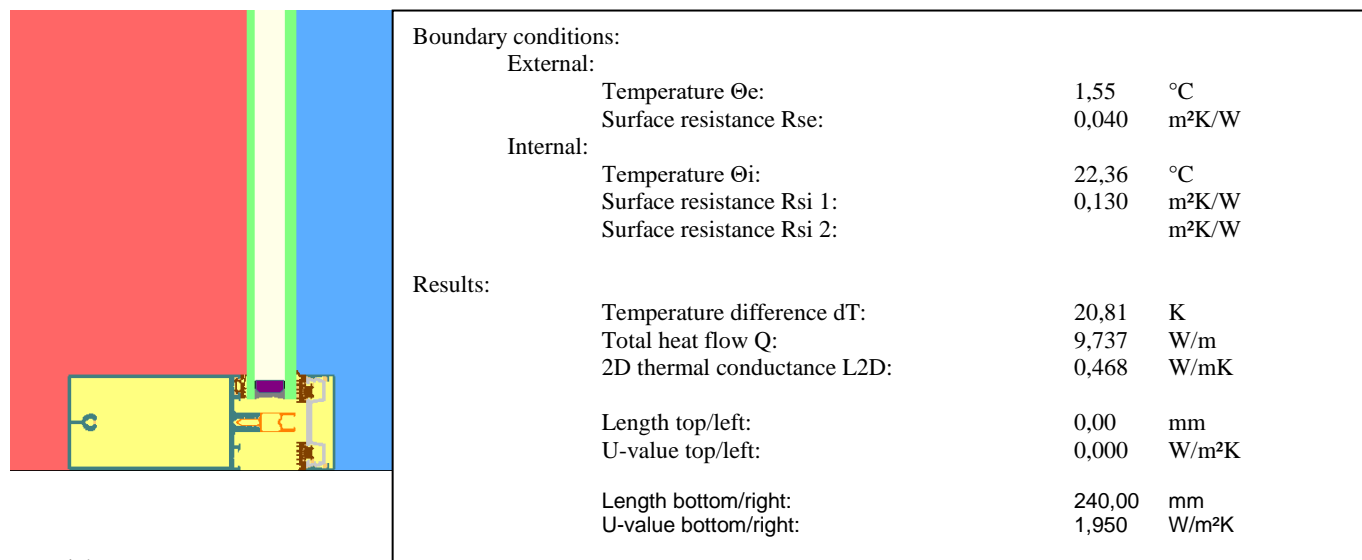
File: C:\Users\gunvo\Documents\Masteroppgave\Sørhellinga\Winiso\Vol2\Endre_grenseb\Sør_bareVindu_gb.f2d

Calculation of the thermal transmission coefficient U_f according to EN ISO 10077-2:2003-12

Simulation model:

Dimensions (width x height): 198,99 x 239,99 mm

Number of elements in simulation model: X-direction: 128; Y-direction: 164



Materials:

Material	R (m ² K/W)	T (°C)	Q(gesamt) (W/m)	10077 konform
****ADIABAT****	0,000	0,000	0,000	
1 boundary condition inside 0,13, 20°C, 50%	0,130	20,000	0,000	X
1 boundary condition outside 0,04, 0°C, 80%	0,040	0,000	0,000	X
1 boundary condition inside 0,20, 20°C, 50%	0,200	20,000	0,000	X
Innetemp. Sørhellinga	0,130	22,360	9,737	-
Utetemp. Sørhellinga	0,040	1,550	-9,737	-
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles <=2mm)				X
1 air EN ISO 10077-2 (cavities in profiles, sparse ventilated)				X

Material	L (W/mK)	10077 konform
Aluminium (Si-Leg) e=0,9	160,000	-
Float 10077	1,000	-
polysulfide	0,400	-
Aluminiumlegierung - unbehandelt	160,000	-
Polyvinylchlorid (PVC-U) hart	0,170	-
butyle	0,240	-
EPDM	0,250	-
silicagel	0,130	-
Gass gir U-verdi = 1.1 på rute	0,022	-



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway