

# Vinduer for energieffektive bygninger

Kuldebroer ved vindusinnsetting

**Larisa Marinova Decheva**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Bjørn Petter Jelle, BAT

Medveileder: Arild Gustavsens, BKHT  
Steinar Grynning, Sintef Byggforsk

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg, anlegg og transport





Oppgavens tittel: Vinduer for energieffektive bygninger - Kuldebroer ved vindusinnsetting	Dato: 11.06.2012 Antall sider (inkl. bilag): 64 (75)	Masteroppgave	<input checked="" type="checkbox"/>	Prosjektoppgave
Navn: Stud.techn. Larisa Marinova Decheva				
Faglærer/veileder: prof. Bjørn Petter Jelle, Institutt for bygg, anlegg og transport prof. Arild Gustavsen, Institutt for byggekunst, historie og teknologi				
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Steinar Grynning, SINTEF Byggforsk				

Ekstrakt:

Formålet med denne masterstudien er å kartlegge og undersøke en del aspekter knyttet til varmetap rundt vinduer. Oppgaven fokuserer på varmegjennomgang og kuldebroer ved tilslutning mellom vinduskarm og vegg. Kuldebroer ved vindusinnsetting kan påvirkes av flere faktorer. Vindusplassering, konstruksjons- og vindustype, materialvalg og oppbygging av monteringsfugen og kvalitet på innsetningsarbeidet er med på å bestemme kuldebroverdien. Flere av disse faktorene påvirker og forsterker hverandre. Masteroppgaven ser spesielt på disse faktorene og sikter på å finne den optimale løsningen for kuldebrofri vindusinnsetting i vegg (hvis mulig).

I masterstudien er det gjort varmemestrømsberegninger for ulike tilslutningsløsninger mellom bunnkarm og vegg ved hjelp av dataprogrammet THERM 6.3. Beregningene er gjennomført som en parameterstudie og belyser betydningen av en rekke faktorer for kuldebroverdien. Resultatene fra beregningene viser at vindusplassering er avgjørende for kuldebroverdien. Plassering av vinduet ytterst i vegglivet er minst gunstig med tanke på minimering av varmetapet og påvirkes mest av andre faktorer, som igjen har innvirkning på kuldebroverdien. Varmestrømsberegningene viser også at kuldebroens størrelse øker med økende isolasjonstykkelse i konstruksjonen. Ved hjelp av noen ikke så avanserte tiltak kan kuldebroverdien reduseres vesentlig. Innvendig tilleggisolering av monteringsfugen, samt bruk av isolasjonsmateriale med lavere varmekonduktivitet i fugen, kan halvere opprinnelig kuldebroverdi for ulike vindusplasseringer.

Denne rapporten fokuserer på kuldebroer ved vindusinnsetting. Andre forhold som kan påvirke varmetransporten rundt vinduer, slik som luftlekkasjer, er ikke tatt med i rapporten.

Stikkord:

1. Kuldebroer
2. Vinduer
3. Varmetap

---

(sign.)



## **FORORD**

Denne masteroppgaven er resultat av avslutningsarbeidet etter 5 års studier ved sivilingeniør studieprogrammet Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Rapporten "Vinduer for energieffektive bygninger - Kuldebroer ved vindusinnsetting" har blitt til gjennom emnet TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, vår 2012. Masteroppgaven er skrevet ved Institutt for bygg, anlegg og transport. Arbeidet er utført i samarbeid med Institutt for byggekunst, historie og teknologi.

Masteroppgaven omhandler ulike aspekter knyttet til varmegjennomgang og kuldebroer ved tilslutning mellom vindu og vegg. Forhold som har betydning for kuldebroverdien er vurdert og underbygget med en parameterstudie. Oppgaven fokuserer på kuldebroer ved vindusinnsetting i ulike veggkonstruksjoner og sikter på å finne den optimale løsningen som vil redusere kuldebroeffekten.

Takk til professor Arild Gustavsen ved Institutt for byggekunst, historie og teknologi for hans vilje til å svare på spørsmål angående både problemstilling og rapportskrivning. Dette arbeidet ville vært svært utfordrende uten hans god veiledning og oppfølging. Jeg vil også takke professor Bjørn Petter Jelle og Steinar Grynning ved Institutt for bygg, anlegg og transport og SINTEF Byggforsk, som ga meg innsikt i viktige momenter ved kuldebroproblematikken.

Trondheim, 11. juni 2012

---

Larisa Marinova Decheva



## SAMMENDRAG

Vinduer har mange oppgaver. De sikrer dagslystilførsel og solvarmetilskudd, formidler visuell kontakt, gir ventilasjons muligheter og kan fungere som rømningsveg. Men vinduenes termiske egenskaper fører til et større varmetap, da de har vesentlig større transmisjonsvarmetap enn godt isolerte vegg- og takpartier. Forholdsvis høy U-verdi og kuldebroer langs vinduskarm og ramme gjør at vinduer kan ha stor innvirkning på energibalansen til en bygning. Vinduer er derfor ofte omtalt som "de termisk svake punktene" i en bygningskropp. I tillegg kan vindusoppbygging og plassering velges og løses på flere måter, og hvilke måter eller løsninger som er mest effektive mht økonomi, miljø, energibruk og bruksegenskaper er fremdeles en del av den løpende fagdiskusjonen.

Formålet med denne masterstudien er å kartlegge og undersøke en del aspekter knyttet til varmetap rundt vinduer. Oppgaven fokuserer på varmegjennomgang og kuldebroer ved tilslutning mellom vinduskarm og vegg. Kuldebroer ved vindusinnsetting kan påvirkes av flere faktorer. Vindusplassering, konstruksjons- og vindustype, materialvalg og oppbygging av monteringsfugen og kvalitet på innsettingsarbeidet er med på å bestemme kuldebroverdien. Flere av disse faktorene påvirker og forsterker hverandre. Masteroppgaven ser spesielt på disse faktorene og sikter på å finne den optimale løsningen for kuldebrofri vindusinnsetting i vegg (hvis mulig).

Tilleggsvarmetapet gjennom vindus/vegg tilslutninger er svært viktig i energisammenheng og bør ikke undervurderes. Uansett hvordan man velger å dokumentere oppfyllelse av energikravene i TEK (ved energiltak eller samlet netto energibehov), vil kuldebroer rundt vinduer spille viktig rolle. Ved bruk av energiltak skal kuldebroer vurderes spesielt opp mot kravet til normalisert kuldebroverdi,  $\Psi$ ". I mange tilfeller kan særlig kuldebroer ved vindusinnsetting være årsaken til at man ikke kommer innenfor kravet på  $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  for småhus eller  $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  for øvrige bygg. Oppfyllelse av myndighetskrav til normalisert kuldebroverdi er imidlertid ofte utilstrekkelig for å fastsette at den optimale vindusløsningen er funnet, da det er flere ytelsesfaktorer knyttet til vinduer som tas i betraktning.

I masterstudien er det gjort varmestrømsberegninger for ulike tilslutningsløsninger mellom bunnkarm og vegg ved hjelp av dataprogrammet THERM 6.3. Beregningene er gjennomført som en parameterstudie og belyser betydningen av en rekke faktorer for kuldebroverdien. Resultatene fra beregningene viser at vindusplassering er avgjørende for kuldebroverdien. Plassering av vinduet ytterst i vegglivet er minst gunstig med tanke på minimering av varmetapet og påvirkes mest av andre faktorer, som igjen har innvirkning på kuldebroverdien. Varmestrømsberegningene viser også at kuldebroens størrelse øker med økende isolasjonstykkelse i konstruksjonen. Ved hjelp av noen ikke så avanserte tiltak kan kuldebroverdien reduseres vesentlig. Innvendig tilleggisolering av monteringsfugen, samt bruk av isolasjonsmateriale med lavere varmekonduktivitet i fugen, kan halvere opprinnelig kuldebroverdi for ulike vindusplasseringer.

Denne rapporten fokuserer på kuldebroer ved vindusinnsetting. Andre forhold som kan påvirke varmetransporten rundt vinduer, slik som luftlekkasjer, er ikke tatt med i rapporten.

## SUMMARY

Windows ensure supply of daylight and solar heat, provide visual contact with the environment, give ventilation possibilities and can be used as a escape route. But windows' thermal properties lead to a greater heat loss, as they have significantly lower thermal resistance than well insulated wall and ceiling sections. Window's relatively high U-value and thermal bridges along the window frame can have a big impact on the energy balance of a building. Windows are therefore often referred to as "the thermal weak points" in a building envelope. In addition, the windows' construction and position can be chosen and assembled in several ways, and which ways or solutions that are most effective in terms of economics, environment, energy use and usage properties, are still a part of the ongoing industry discussion.

The main purpose of this master thesis is to register and examine some aspects related to the linear thermal transmittance around windows. The study focuses on thermal bridges in the wall/window joint. Thermal bridges around the windows can be affected by several factors. The position of the window, the window and wall construction, the material selection and construction of the joint space and the quality of the implementation are some of the factors that determine the linear thermal transmittance. Several of these factors affect each other. The master thesis examines these factors and aims to find the optimal solution for a window/wall joint that is free from thermal bridges (if possible).

The additional heat loss through a window/wall joint is very important in a energy context and should not be underestimated. No matter how the energy requirements in the Norwegian Building regulations are fulfilled (by individual energy requirements or by overall energy limitations), the thermal bridges' effect around windows should be taken in to account. When using the individual energy requirements, thermal bridges should be considered up to the required value for normalized linear thermal transmittance,  $\Psi''$ . In many cases, especially the thermal bridges in the window/wall joints can be the reason that one does not come within the requirement for  $\Psi''$  of 0,03 W/(m<sup>2</sup>K) for a small house or 0,06 W/(m<sup>2</sup>K) for other buildings. Fulfillment of the energy requirements is, however, insufficient to state that the optimal window solution is found, because there are several performance factors related to windows that should be taken into account.

Several heat flux calculations have been made for various joints between a lower window frame and a wall, using the program THERM 6.3. The calculations are carried out as a parameter study and show the importance of a number of factors for the linear thermal transmittance. The results of the calculations show that the window position in the wall is crucial to the thermal bridge value. Positioning the window towards the outer side of the wall is inefficient in terms of minimizing the heat loss. The calculations show also that the thermal bridge's size increases with increasing insulation width in the construction. The thermal transmittance can be significantly reduced by using some not so advanced measures. Additional insulation on the inner side of the joint, as well as the use of insulation material with lower thermal conductivity, can halve the original thermal transmittance for various window positions.

This report focuses on the thermal bridges in the wall/window joints. Other factors that can affect the heat transport around windows, such as air leakages, are not included in the report.



**INNHOLDSFORTEGNELSE**

1	INNLEDNING.....	1
2	KULDEBROER.....	3
2.1	Definisjoner .....	3
2.2	Eksempler på kuldebroer .....	5
2.3	Konsekvenser av kuldebroer .....	6
2.3.1	Økt varmetap .....	7
2.3.2	Lave overflatetemperaturer .....	7
2.3.3	Redusert komfort.....	7
2.3.4	Overflatekondens .....	7
2.3.5	Sverting .....	8
2.3.6	Temperaturspenninger.....	8
2.4	Metoder for beregning av kuldebroverdi.....	8
3	KULDEBROER VED VINDUSINNSETTING.....	11
3.1	Arealer .....	11
3.2	Hva regnes med i kuldebroverdien.....	11
3.3	Faktorer/forhold som kan ha innvirkning på kuldebroverdien .....	12
3.3.1	Vindusplassering .....	12
3.3.2	Konstruksjonstype .....	13
3.3.3	Vindustype .....	13
3.3.4	Materialvalg og oppbygging av monteringsfugen .....	14
3.3.5	Kvalitet på innsettingsarbeidet .....	15
3.4	Konsekvenser av kuldebroer ved vindusinnsetting .....	15
4	TILTAK FOR Å REDUSERE KULDEBROVERDI FOR INNSETTING AV VINDUER.....	16
5	VARMESTRØMSBEREGNINGER .....	22
5.1	Metode .....	22
5.1.1	Beregningsverktøy .....	22
5.1.2	Fremgangsmåte .....	23
5.1.3	Grensebetingelser .....	24
5.2	Beskrivelse av konstruksjonene og materialdata.....	24
5.2.1	Vindu.....	24
5.2.2	Isolasjonspanel .....	25

5.2.3	Veggkonstruksjoner .....	26
5.2.4	Tilslutningsdetaljer .....	26
5.2.5	Materialdata .....	28
5.3	Resultater og drøfting .....	29
5.3.1	Forstudie .....	29
5.3.2	Hovedstudie .....	33
5.4	Feilkilder .....	45
6	KONKLUSJON .....	47
7	REFERANSER .....	49
8	VEDLEGG .....	52

VEDLEGG 1 - Oppgavetekst

VEDLEGG 2 - Eksempel på beregning av kuldebroverdi i Excel regneark

VEDLEGG 3 - Isotermer og fargeplott av temperaturfordeling for noen utvalgte tilslutningsdetaljer

**FIGURLISTE**

Figur 1 Totalt varmetap. (Byggdetaljer 471.015) .....	3
Figur 2 Eksempler på kuldebroer. (Byggdetaljer 471.015).....	5
Figur 3 Skisse av en bygning som viser plassering av typiske kuldebroer. (NS-EN ISO 14683:2007) .....	6
Figur 4 Eksempel på kuldebrotabell fra Byggdetaljer 471.017 .....	9
Figur 5 Eksempel på todimensjonal varmestrømsberegning i THERM .....	10
Figur 6 Illustrasjon av vindusdetalj - arealfordeling. (Gustavsen, A. m.fl. 2008) .....	11
Figur 7 Eksempler på vindusplassering og respektive kuldebroverdier. (Byggdetaljer 471.015) .....	12
Figur 8 Vindusinnsetting i ulike veggkonstruksjoner. (Byggdetaljer 523.702).....	13
Figur 9 Eksempler på karm- og rammeprofiler. (Byggdetaljer 533.102) .....	14
Figur 10 Prinsipp av innvendig isolert vindu. Til venstre snitt av topp- og sidekarm, til høyre snitt av bunnkarm. (Arnesen, H. m.fl. 2009).....	17
Figur 11 Ulike løsninger for tilslutning mellom vindu og vegg. (Laustsen, Noye og Svendsen 2009).....	17
Figur 12 Prinsippskisse av innsetting av vindu i utvendig isolert murvegg. Alternativ plassering av isolasjonen i skissen til høyre. (Feist, W. og Born, R. 2012).....	18
Figur 13 Tradisjonell og ny vindusdesign. (Schultz og Svendsen, 2000 og Schultz, 2002)....	19
Figur 14 Fargeplott av temperaturfordeling for tradisjonell (til venstre) og ny vindusdesign (til høyre). (Schultz, J.M. 2002).....	19
Figur 15 Karm- og rammeprofil til kombinasjonsvindu. Temperaturfordeling for veggtilslutning. (Laustsen, Noye og Svendsen, 2009) .....	20
Figur 16 Smal ramme- og karmløsning. (Kristiansen og Schultz 2002).....	21
Figur 17 Simuleringsprosedyre i THERM .....	23
Figur 18 NTECH passiv vindu, (NorDan 2010) .....	25
Figur 19 NTECH vindu - THERM modell .....	25
Figur 20 Profil med isolasjonspanel i henhold til NS-EN ISO 10077-2, Tillegg C.....	25
Figur 21 Prinsippskisse av monteringsfuge. (Byggdetaljer 523.701) .....	26
Figur 22 Beslag og tetningsprinsipper. (Byggdetaljer 523.702) .....	27
Figur 23 Innsetting av vindu i et homogent veggpanel og temperaturfordeling.....	29
Figur 24 Variasjon av kuldebroverdi som følge av endring i varmekonduktivitet og U-verdi til veggpanelet. Konstant paneltykkelse. Beregnet for tre vindusplasseringer.....	30
Figur 25 Variasjon av kuldebroverdi som følge av endring i paneltykkelse og varmekonduktivitet. Konstant U-verdi til veggpanelet. Beregnet for tre vindusplasseringer..	31
Figur 26 Variasjon av kuldebroverdi som følge av endring i paneltykkelse og U-verdi. Konstant varmekonduktivitet til veggpanelet. Beregnet for tre vindusplasseringer. ....	32
Figur 27 Skisse av beregningsmodell og kuldebroverdier for variert vindusplassering. Bindingsverksvegg med 246 mm isolasjon.....	33
Figur 28 Temperaturfordeling for vindusplasseringer - 42 mm (til venstre) og + 140 mm (til høyre). .....	34
Figur 29 Skisse av beregningsmodell og kuldebroverdier for variert vindusplassering. Variert isolasjonstykkelse.....	34

Figur 30 Skisse av beregningsmodell og kuldebroverdier for uisolerte karm og ramme. Bindingsverksvegg med 246 mm og 296 mm isolasjon. ....	35
Figur 31 Skisse av beregningsmodell med høyere vindusbrett. Kuldebroverdier for fem vindusplasseringer. ....	35
Figur 32 Skisse av beregningsmodell med høyere vindusbrett, ekstra isolert. Kuldebroverdier for tre vindusplasseringer. ....	36
Figur 33 Beregningsmodell og kuldebroverdier for endret isolasjonsmateriale i monteringsfugen. Beregnet for fem vindusplasseringer. ....	36
Figur 34 Skisse av beregningsmodell for kombinasjon av parametre. ....	37
Figur 35 Temperaturfordeling for referanse konstruksjon (til venstre) og for kombinasjonsløsning (til høyre). ....	37
Figur 36 Innsetting av vindu i vegg av porebetongblokker med utvendig isolert utlekting. Kuldebroverdier for fem vindusplasseringer. ....	38
Figur 37 Temperaturfordeling i tilslutningsdetaljen. Vegg av porebetongblokker med utvendig isolert utlekting. ....	38
Figur 38 Skisse av beregningsmodell og kuldebroverdier for vegg av lettklinkerblokker. Tre ulike vindusplasseringer. ....	39
Figur 39 Fargeplott av temperaturfordeling for vegg av lettklinkerblokker med innvendig isolering. ....	39
Figur 40 Innsetting av vindu i skallmurvegg av tegl (Murkatalogen, 2006). Kuldebroverdier for tre vindusplasseringer. ....	40
Figur 41 THERM-modeller og temperaturfordeling for to vindusplasseringer i skallmurvegg av tegl. ....	41
Figur 42 Beregningsmodell og kuldebroverdier for betongvegg med innvendig utlekting og utvendig isolasjon med puss. To vindusplasseringer. ....	42
Figur 43 Fargeplott av temperaturfordeling for to vindusplasseringer i betongveggen. ....	42

## TABELLISTE

Tabell 1 Kuldebroregnskap for småhus i tre (BRA 160 m <sup>2</sup> ). (Gustavsen, A. m. fl. 2008). ....	1
Tabell 2 Metoder for beregning av kuldebroverdi. (NS-EN ISO 14683:2007) ....	8
Tabell 3 Kuldebroverdi for forskjellige vindusplasseringer. (Byggdetaljer 471.015) ....	16
Tabell 4 Varmeovergangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946:2007, [m <sup>2</sup> K/W] ....	24
Tabell 5 Temperaturer, NS-EN ISO 10077-2 ....	24
Tabell 6 Karm/ramme dimensjoner (bunnkarm) ....	25
Tabell 7 Materialdata ....	28
Tabell 8 Kuldebroverdier for innsetting av vindu, basert på vindusplassering. ....	43

## SYMBOLER OG INDEKSER

En del symboler, indekser og forkortelser er benyttet i denne rapporten. En liste over disse er vist under.

<b><math>\Psi</math></b>	: kuldebroverdi (lineær varmegjennomgangskoeffisient) [W/(mK)]
<b><math>X</math></b>	: punktkuldebroverdi [W/K]
<b><math>\Psi''</math></b>	: normalisert kuldebroverdi [W/(m <sup>2</sup> K)]
<b><math>U</math></b>	: varmegjennomgangskoeffisient (U-verdi) [W/(m <sup>2</sup> K)]
<b><math>A</math></b>	: areal [m <sup>2</sup> ]
<b><math>l</math></b>	: lengde [m]
<b><math>d</math></b>	: tykkelse/bredde [m]
<b><math>b</math></b>	: avstand [mm]
<b><math>H_D</math></b>	: varmetransportkoeffisient [W/K]
<b><math>R</math></b>	: varmeovergangsmotstand [m <sup>2</sup> K/W]
<b><math>\lambda</math></b>	: varmekonduktivitet [W/(mK)]
<b><math>L^{2D}</math></b>	: todimensjonal varmekoplingskoeffisient [W/(mK)]
<b><math>\Delta T</math></b>	: temperaturdifferanse [K]
<b>BRA</b>	: bruksareal
<b>si</b>	: innvendig flate
<b>se</b>	: utvendig flate
<b>g</b>	: glass (rute)
<b>f</b>	: karm/ramme
<b>p</b>	: panel/isolasjonspanel
<b>Pbl</b>	: Plan- og bygningsloven
<b>TEK</b>	: Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven



# 1 INNLEDNING

De siste års oppmerksomhet på energibruk i bygninger har ført til økt fokus på bygningskroppen og dens komponenter. Vegger, tak, gulv og vinduer har fått lavere U-verdier og resulterer i økt isolasjonstykkelse og derfor tykkere bygnings komponenter. For vinduer betyr dette flere lag glass, ulike typer belegg og tilsetningsstoffer. Denne utviklingen mot lavere U-verdier fører til potensielle bygningstekniske konsekvenser, som man ikke er fullt ut kjent med. En del av den løpende fagdiskusjonen, er i denne sammenheng, kuldebroer ved vindusinnsetting.

En kuldebro er et begrenset parti av en bygningskonstruksjon som har vesentlig lavere varmemotstand enn konstruksjonen omkring. En kuldebro er i praksis en "varmebro" (eng. thermal bridge), siden det er varmen som leddes ut. Ved kuldebroer oppstår det en lokal, sterk varmestrøm og et ekstra varmetap.

Kuldebroer kan ha stor virkning på bygningens totale varmetap og kan ha en rekke andre uheldige konsekvenser for både bygg og brukere. I Prosjektrapport 25 - *Kuldebroer - Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*, utarbeidet av SINTEF Byggforsk, er det gjort en eksempelberegning av normalisert kuldebroverdi. Resultatene er et godt eksempel på betydningen av kuldebro-problematikken og er derfor vist i tabellen under. Beregningene er gjort for et hus der det har vært fokus på å redusere kuldebroene ("Lite kuldebroer") og for et vanlig hus med normale løsninger. Tabellen gir en veldig god oversikt over størrelsen på ulike kuldebroverdier og kuldebroenes bidrag til varmetapet. Det fremkommer av regnskapet at det er nødvendig med full fokus på å minimalisere kuldebroene for å tilfredsstille kravet til normalisert kuldebroverdi i TEK på  $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

**Tabell 1 Kuldebroregnskap for småhus i tre (BRA 160 m<sup>2</sup>). (Gustavsen, A. m. fl. 2008).**

Overgangsdetalj	Lengde (m)	Antall	Total lengde (m)	Kuldebro-verdi (W/(mK))		Kuldebro (W/K)	
				Lite kuldebroer	Normale løsninger	Lite kuldebroer	Normale løsninger
Tak/langvegg	10	2	20	0,01	0,02	0,2	0,4
Tak/gavlvegg	8,7	2	17,4	0,03	0,03	0,52	0,52
Møne	10	1	10	0,02	0,02	0,2	0,2
Etasjeskiller, langvegg	10	2	20	0	0	0	0
Etasjeskiller, gavlvegg	8	2	16	0	0	0	0
Vegg/ringmur/gulv	36	1	36	0,05	0,09	1,85	3,33
Vindu/vegg	4,8	15	72	0,01	0,05	0,72	3,6
Dør/vegg	6	2	12	0,01	0,04	0,12	0,48
Hjørner	5	4	20	0,03	0,03	0,6	0,6
Totalt varmetap						4,21	9,13
<b>Normalisert kuldebroverdi (W/m<sup>2</sup>K)</b>						<b>0,03</b>	<b>0,06</b>

Kuldebroregnskapet illustrerer også at det største relative bidraget skyldes tilslutning mellom vegg og vindu. Med normale løsninger er dette bidraget hele 40 % av totalt varmetap på grunn

av kuldebroer. For et tilsvarende hus, men der det har vært fokus på å redusere kuldebroene, er vindu/vegg kuldebrobidraget redusert til 17 % av totalt varmetap.

Selv om man har kunnskap om kuldebroer i bygninger, er det fremdeles mye som er uavklart når det gjelder kuldebroer ved vindusinnsetting. Vindusoppbygging og plassering kan løses på flere måter. Ofte er det motstridende anbefalinger og krav til de ulike løsningene, da det må tas hensyn til både varmetekniske, fukttekniske og arkitektoniske forhold.

Formålet med denne masterstudien er å kartlegge og undersøke en del aspekter knyttet til varmetap rundt vinduer. Oppgaven fokuserer på varmegjennomgang og kuldebroer ved tilslutning mellom vinduskarm og vegg. Kuldebroverdi for ulike tilslutningsløsninger avhenger av mange faktorer som påvirker og forsterker hverandre. Masteroppgaven vil se spesielt på disse faktorene og sikte på å finne den optimale løsningen for kuldebrofri vindusinnsetting i vegg (hvis mulig).

Rapportens oppbygging baseres på teoretisk og praktisk arbeid. Kapittel 2, 3 og 4 er basert på et litteraturstudium. Kapittel 2 tar for seg generelle forhold rundt temaet kuldebroer i bygninger. Kapitler 3 og 4 kartlegger ulike aspekter og vurderinger knyttet til kuldebroer ved vindusinnsetting. Kapittel 5 tar for seg varmestrømsberegninger for forskjellige vindus/vegg konstruksjoner og presenterer metode, resultater og feilkilder relatert til de gjennomførte beregningene.

Det har vært noen begrensninger knyttet til rapportens behandling av valgt tema. I arbeidet ble det funnet få litteraturkilder om kuldebroer ved vindusinnsetting i ulike veggkonstruksjoner. Noen tekniske problemer med dataprogrammet THERM har også vært til hinder.



## 2 KULDEBROER

Dette kapittelet tar for seg relevante begrep og definisjoner, eksempler og noen vurderinger rundt temaet kuldebroer i bygninger.

### 2.1 Definisjoner

#### Kuldebro

En kuldebro er et begrenset parti av en bygningskonstruksjon som har vesentlig lavere varmemotstand enn konstruksjonen omkring. I slike partier oppstår det en lokal, sterk varme-strøm og et ekstra varmetap. Endringene i varmemotstanden skyldes en eller flere av punktene nedenfor (Gustavsen, A. m.fl. 2008):

- Den omsluttende konstruksjonen gjennomtrenges helt eller delvis av materialer med høyere varmekonduktivitet
- Det er en endring av konstruksjonens tykkelse
- Det er en forskjell mellom utvendig og innvendig areal (geometrisk kuldebro)

#### Varmetap

Varmetap fra bygninger beregnes etter NS 3031. I veiledningen til TEK er det spesifisert at man kan fordele varmetapet i tre poster: transmisjons-, infiltrasjons- og ventilasjonsvarmetap. Varmetap gjennom kuldebroer utgjør en del av transmisjonsvarmetapet.

Ifølge NS 3031 beregnes varmetransportkoeffisienten,  $H_D$ , for konstruksjoner mot det fri i henhold til følgende formel:

$$(1) H_D = \sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k \Psi_k \cdot l_k + \sum_j X_j \quad [W/K]$$

der

$A_i$  : er arealet til bygningsdelen basert på totalt innvendig mål, i  $m^2$ . For vinduer benyttes totalt vindusareal, inkludert arealet av karm/ramme;

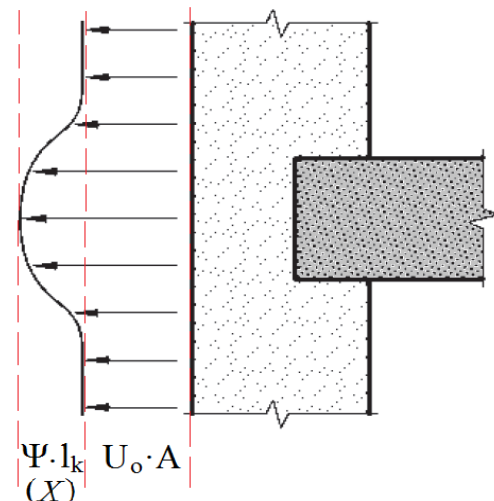
$l_k$  : er lengden av lineær kuldebro basert på totalt innvendig mål for kuldebro  $k$ , i meter;

$U_i$  : er varmegjennomgangskoeffisienten for element,  $i$ , i  $W/(m^2K)$ ;

$\Psi_k$  : er kuldebroverdien for kuldebro,  $k$ , beregnet ut fra totalt innvendig mål, i  $W/(mK)$ ;

$X_j$  : er varmegjennomgangskoeffisienten for en punktformig kuldebro,  $j$ , i  $W/K$ ;

Totalt varmetap



Figur 1 Totalt varmetap. (Byggedetaljer 471.015)

For denne overgangsdetaljen er totalt varmetap lik summen av varmetap gjennom vegg og varmetap fra kuldebroer (lineære og tredimensjonale).

Ved beregning av varmetapet er det viktig å presisere hvilke arealer og lengder benyttes. Ifølge NS 3031 skal alle beregninger baseres på innvendige mål. Dette gjelder også måten kuldebroverdiene beregnes på.

### Kuldebroverdi, $\Psi$

Kuldebroverdien (også kalt varmegjennomgangskoeffisient) angir kvantitativt hvor stort varmetap en kuldebro medfører. Det ekstra varmetapet for langstrakte kuldebroer angis i W/(mK) og benevnes *lineær kuldebroverdi*,  $\Psi$  (NS-EN ISO 10211:2007). Verdien angir varmetapet per lengdeenhet av kuldebroen og per grad temperaturforskjell. For tredimensjonale kuldebroer benyttes benevnelsen *punktkuldebroverdi*,  $X$  og enheten er W/K per stk.

Kuldebroverdien kan forenklet beskrives som differansen mellom varmetapet med kuldebro og varmetapet uten kuldebro. I NS-EN ISO 10211 er beregning av lineær varmegjennomgangskoeffisient uttrykt med følgende likning:

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

der  $L^{2D}$  er den lineære varmekoplingskoeffisienten oppnådd med en todimensjonal beregning av bygningsdelen som skiller de to aktuelle omgivelsene, angitt i W/(mK).  $U_i$  er  $U$ -verdiene til konstruksjonene tilsluttet kuldebroen, regnet hver for seg selv, og  $l_i$  er lengdene til disse konstruksjonene.

Beregning av kuldebroverdi avhenger av konstruksjonstype og konstruksjonsplassering. Generelt skiller man mellom: a) Konstruksjoner over bakken og b) Konstruksjoner på grunnen og under grunnen.

Kuldebroverdien oppgis normalt med to signifikante sifre (NS-EN ISO 10077-2). I enkelte tilfeller kan flere desimaler benyttes for å vise små variasjoner i verdien.

### Normalisert kuldebroverdi, $\Psi''$

Normalisert kuldebroverdi,  $\Psi''$ , er summen av varmetapet til alle kuldebroene, dividert med oppvarmet bruksareal,  $A_{BRA}$  (Byggdetaljer 471.015). Verdien beregnes for hele bygningen og er definert som:

$$(3) \quad \Psi'' = \frac{\sum_k \Psi_k \cdot l_k + \sum_j X_j}{A_{BRA}} \quad [W/(m^2K)]$$

$\Psi_k$  : er kuldebroverdi (lineær varmegjennomgangskoeffisient) [W/mK]  
 $l_k$  : er lengden på lineær kuldebro, k [m]  
 $X_j$  : er kuldebroverdi for punktkuldebro, j [W/K]  
 $A_{BRA}$  : er oppvarmet bruksareal [m<sup>2</sup>], beregnet etter NS 3940

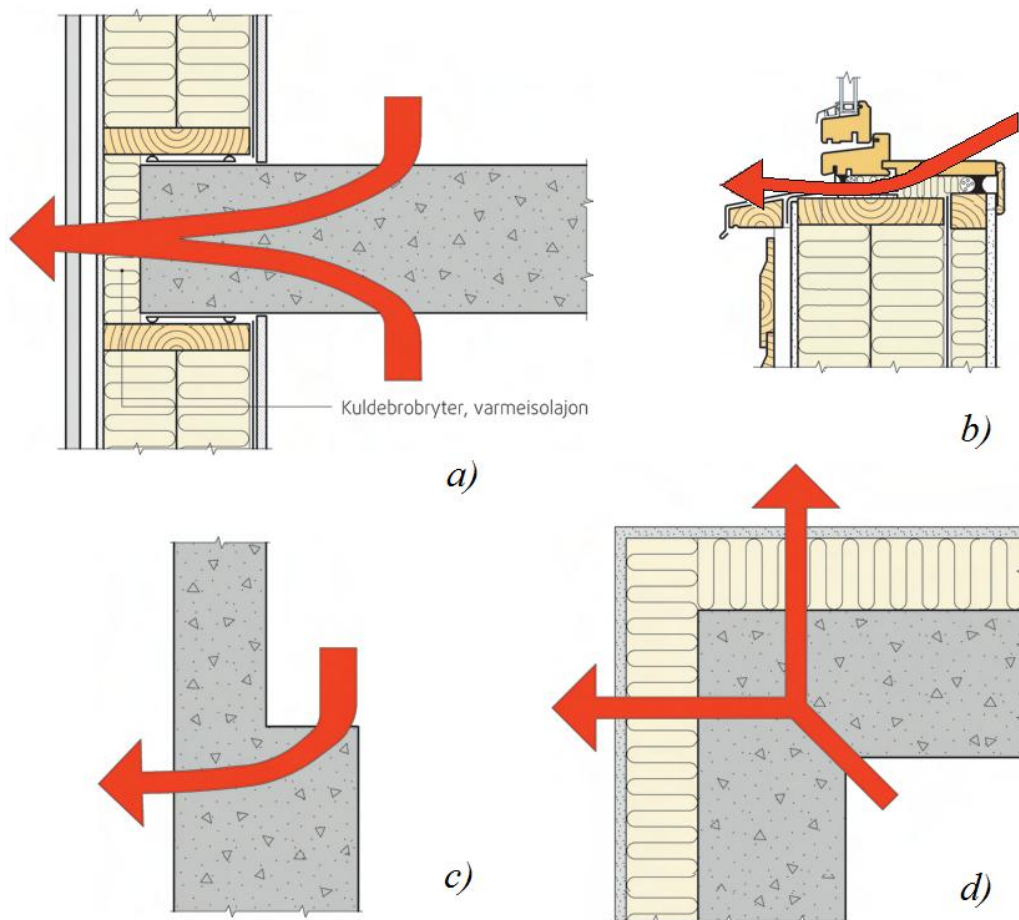
I TEK 10 § 14-3 stilles det kvantifiserte krav til hvor stor varmetapet gjennom en bygnings kuldebroer kan være. Kravene til normalisert kuldebroverdi,  $\Psi''$  ble først introdusert i TEK 07

(Gustavsen, A. m.fl. 2008). Normalisert kuldebroverdi skal ikke overstige  $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  for småhus og  $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  for øvrige bygninger. Arealet ( $\text{m}^2$ ) oppgis i oppvarmet bruksareal, BRA (TEK 10).

Ifølge veiledningen til TEK skal kun bestemte kuldebroer vurderes opp mot kravet til normalisert kuldebroverdi. Dette er kuldebroer som ikke inngår i konstruksjonsdelers U-verdi, men forekommer hovedsakelig i overganger mellom konstruksjonsdeler. Slike kuldebroer er knyttet til etasjeskillere, pilastere, vinduer osv.. Kuldebroer som naturlig inngår i en bygningsdel skal være inkludert i konstruksjonsdelens U-verdi etter reglene i NS-EN ISO 10211. Slike kuldebroer fremkommer gjennom konstruksjonsmåte, som for eksempel stendere i en stenderverksvegg og taksperrer og annet treverk i tak.

## 2.2 Eksempler på kuldebroer

Som beskrevet i forrige delkapittel forårsakes kuldebroer av en eller flere forhold. Figur 2 a) og b) viser typiske kuldebroer i den omsluttende konstruksjonen som er forårsaket av hel eller delvis gjennomtrengning av materialer med høyere varmekonduktivitet. Figur 2 c) viser en kuldebro som skyldes endring i konstruksjonens tykkelse og figur 2 d) illustrerer en geometrisk kuldebro ved et hjørne.

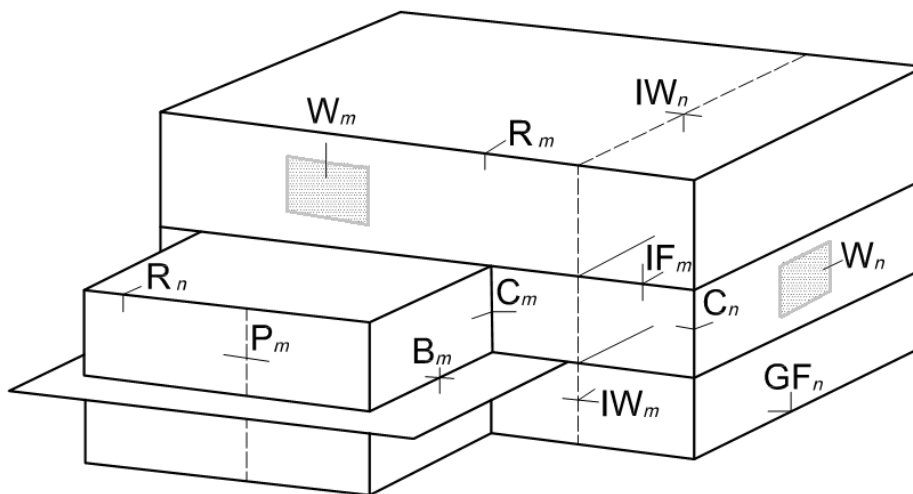


Figur 2 Eksempler på kuldebroer. (Byggdetaljer 471.015)

Kuldebroer kan forekomme både innenfor hver bygningsdel og i overgangen mellom bygningsdeler. NS-EN ISO 14683 gir en oversikt over de vanligste kuldebro-forekomstene:

- i overganger mellom utvendige konstruksjonselementer (vegg/tak, vegg/golv, hjørner);
- i overganger mellom innvendige vegger og yttervegger, samt mellom innvendige vegger og tak;
- i overganger vegg/etasjeskiller;
- ved søyler i yttervegger;
- rundt vinduer og dører;

En prinsippsskisse hentet fra NS-EN ISO 14683 viser hvor i en bygning de typiske kuldebroene forekommer, se figur 3. Symbolene i figuren angir lokalisering av de ulike kuldebroene.



Figur 3 Skisse av en bygning som viser plassering av typiske kuldebroer. (NS-EN ISO 14683:2007)

Kuldebroenes lokalisering vil i prinsippet være den samme, uansett konstruksjonstype. Kuldebroenes størrelse vil imidlertid ha direkte sammenheng med konstruksjonstype. Generelt sett er kuldebroeffekten mindre for lette konstruksjoner, som for eksempel bygninger i tre, enn for tunge betongbygninger.

### 2.3 Konsekvenser av kuldebroer

Kuldebroer i bygninger kan ha en rekke negative konsekvenser. De har betydning for byggets energibalanse, for brukernes komfort og helse, og ikke minst for byggets estetisk og byggeteknisk tilstand. De energimessige konsekvensene av å overse kuldebroer er ofte større enn det energiberegninger tilsier fordi det er flere faktorer som griper inn i hverandre.

Konsekvensene av kuldebroer er ofte komplekse og kan påvirke og forsterke hverandre. Økt varmetap og lave overflatetemperaturer kan betraktes som hovedkonsekvenser (Byggdetaljer 471.015). Lave overflatetemperaturer kan videre resultere i redusert komfort, overflatekondens, sverting og temperaturspenninger. Konsekvensene av kuldebroer er diskutert nærmere i de følgende avsnittene.

### 2.3.1 Økt varmetap

Ved kuldebroer oppstår det en sterk varmestrøm på grunn av dårligere varmeisolasjonsevne. Dette fører til ekstra varmetap gjennom både konstruksjonsdeler og bygget som helhet. Kuldebroer i bygningsdeler kan ha stor effekt på bygningsdelens varmemotstand. I noen tilfeller kan kuldebroer føre til at den gjennomsnittlige U-verdien for en yttervegg mer enn fordobles (Novakovic, V. m. fl. 2007). Husets samlede varmetap kan øke merkbart som følge av kuldebroer. Dette tilleggsvarmetapet kan utgjøre en relativt stor prosentandel av det totale transmisjonsvarmetapet. Kuldebroer kan derfor ha økonomisk betydning i form av høyere fyringsutgifter.

### 2.3.2 Lave overflatetemperaturer

Kuldebroer kan medføre lave temperaturer lokalt på innsiden av konstruksjonen, mens utvendige overflatetemperaturer blir høyere. Det kan være en merkbar forskjell på flere grader mellom temperaturen på kuldebropartiet og omkringliggende konstruksjon. Risikoen for lave overflatetemperaturer er større i kroker og hjørner hvor det er mindre luftbevegelse (Gustavsen, A. m.fl. 2008). Lave overflatetemperaturer kan ofte kompenseres med økt romtemperatur, noe som ytterligere øker varmetapet (Novakovic, V. m.fl. 2007).

### 2.3.3 Redusert komfort

Lave overflatetemperaturer kan medføre nedsatt varmekomfort. Termisk komfort (ev. varmekomfort) er en subjektiv følelse eller sinnstilstand der mennesker er tilfreds med de termiske omgivelsene (Byggdetaljer 421.501). Man ønsker det verken varmere eller kaldere, verken for kroppen som helhet eller for de enkelte kroppsdelene. Varmekomfort avhenger av bekleddingen, aktivitetsnivået og det termiske inn klimaet. Det termiske inn klimaet er sammensatt av flere fysiske faktorer: lufttemperatur, luftfuktighet, lufthastighet og temperatur på omgivende flater.

Kuldebroer påvirker hovedsakelig temperaturen på omgivende flater. Det er først og fremst temperaturen på golv som har betydning for varmekomforten, siden golv er den delen av en bygning menneskene er i direkte kontakt med. Nedkjølte golvflater kan gi direkte ubehag for de som oppholder seg i rommet. Et golvkaldt hus kan i tillegg gi en trekkfølelse på grunn av strålingstapet til lokale veggpartier (Novakovic, V. m.fl. 2007).

For å redusere den negative virkningen av lave overflatetemperaturer på brukernes komfort kan det være nødvendig å øke lufttemperaturen. Dette medfører igjen større varmetap.

### 2.3.4 Overflatekondens

Lokal kondens kan oppstå ved kuldebroer dersom overflatetemperaturen blir vesentlig lavere enn for konstruksjonen omkring og luftas fuktighet er høy (Byggdetaljer 471.015). Når luft er i kontakt med en kald flate, synker luftas temperatur og relative fuktigheten øker, til den når 100 % ved duggpunktstemperaturen. Dersom overflatetemperaturen er lavere enn luftas duggpunktstemperatur, avgir lufta fukt som kondens på flaten. Fukt kan kondensere i form av is på de kaldeste flatene. I noen tilfeller når det er brukt vannsugende materialer, kan materia-

lets varmekonduktivitet stige, og dermed blir kuldebrovirkningen enda sterkere. Ujevn uttørring av for eksempel vegger kan føre til utvendig misfarging og saltutslag.

Overflatekondens kan føre til muggvekst og nedbrytning av overflatematerialene. Muggvekst kan være både estetisk skjemmende og medføre helseisiko. Kuldebroer som fører til kondens bør derfor isoleres. Et isolasjonssjikt på ca. 20 mm gir som regel tilstrekkelig høy overflate-temperatur til å unngå kondens (Byggforvaltning 740.111).

### 2.3.5 Sverting

Sverting eller støvkondens oppstår når støvpartikler fester seg til en overflate. Støvpartikler fester seg lettere til kalde overflater enn til varme og gir sjenerende tilsmussing omkring kuldebroer (Gustavsen, A. m.fl. 2008). Støvkondens opptrer på de samme stedene der man får fukt-kondens, men ved mindre forskjeller mellom ute- og innetemperatur. Dette skjer vanligvis først i kroker og hjørner, men skap, hyller og andre møbler som står mot en vegg kan også føre til problemer. Sverting bidrar negativt til bygningens visuelle miljø.

### 2.3.6 Temperaturspenninger

Kuldebrovirkning kan føre til kraftige temperatursprang i enkelte konstruksjonsdeler. Ulike temperaturgradienter kan føre til spenningskonsentrasjoner og risiko for sprekker. Veldig kalde overflater kan være spesielt utsatte for temperatursprekker på grunn av isdannelse.

## 2.4 Metoder for beregning av kuldebroverdi

Kuldebroverdi kan beregnes på ulike måter. NS-EN ISO 14683 gir en oversikt over metodene for beregning av lineær kuldebroverdi, samt forventet usikkerhet. Dette er vist i tabell 2. En nærmere beskrivelse av de aktuelle metodene er gitt i Byggetaljer 471.016.

Tabell 2 Metoder for beregning av kuldebroverdi. (NS-EN ISO 14683:2007)

Metode	Kommentarer	Forventet usikkerhet for $\Psi$
Numerisk beregning	Bruk av dataprogrammer. Størst nøyaktighet. Beregninger i henhold til NS-EN ISO 10211.	$\pm 5 \%$
Kuldebrotabeller	Tabelloppslag basert på faste mål og materialer. (Byggetaljer 471.017)	$\pm 20 \%$
Manuell beregning	Forenklete beregninger for en bestemt type kuldebro. (Byggetaljer 471.016)	$\pm 20 \%$
Normalverdier	Grovestimering tidlig i prosjekteringsfasen. (Oversikt over normalverdier gitt i NS-EN ISO 14683:2007, Anneks A)	0 - 50 %

### Normalverdier

Tidlig i prosjekteringsfasen er det ofte ønskelig å få oversikt over aktuelle kuldebroer. Grovestimering basert på normalverdier kan danne grunnlag for innledende kuldebrovurderinger.

Grovestimatene er svært konservative og gir som regel større kuldebroverdier enn de virkelige. Anneks A i NS-EN ISO 14683 angir normalverdier for forskjellige typiske konstruksjoner. De presenterte verdiene tar hensyn til kuldebrolokalisering og hvordan isolasjonen er plassert i forhold til bærekonstruksjonen.

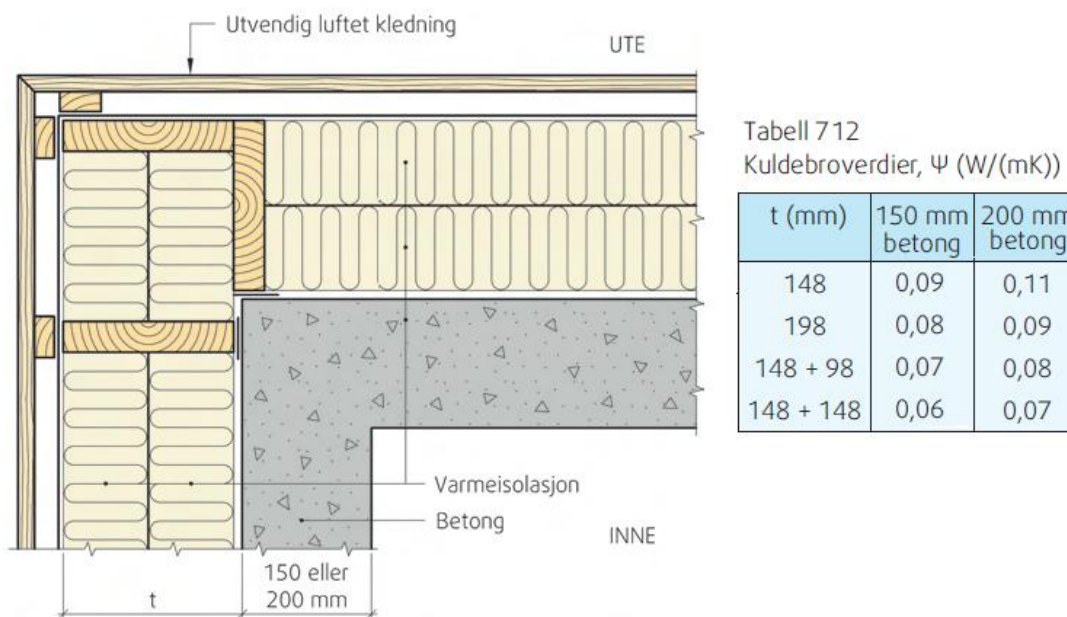
### Manuell beregning

Manuelle beregninger av kuldebroer kan være vanskelige og egner seg primært for enkle konstruksjoner. Beregningene gjennomføres for en bestemt type kuldebro og beregningenes pålitelighet kan variere mye når andre typer kuldebroer betraktes. En manuell metode er presentert i Byggdetaljer 471.016 *Kuldebroer - Metoder for å bestemme kuldebroverdi*.

### Kuldebrotabeller

Tabelloppslag gir en mer nøyaktig angivelse av kuldebroverdien enn grovestimatene. En forutsetning er at man finner akkurat den riktige detaljen i tabelloppslaget. Kuldebrotabeller er imidlertid mindre fleksible enn beregninger fordi tabellene inneholder faste parametre som faste mål og materialer. I mange tilfeller vil den faktiske detaljen avvike fra den tabulerte detaljen. Det er likevel mulig å benytte tabellverdien dersom man kan dokumentere at den vurderte detaljen har like eller bedre termiske egenskaper enn konstruksjonen i tabellen. Det er også mulig å interpolere eller ekstrapolere mellom gitte tabellverdier for å finne kuldebroverdien.

Kuldebrotabeller for en rekke forskjellige konstruksjoner er angitt i Byggdetaljer 417.017. Verdiene i tabelloppslaget er hovedsakelig oppnådd ved hjelp av todimensjonale varme-strømsberegninger i henhold til NS-EN ISO 10211. Figur 4 viser et eksempel på en detalj med kuldebroverdier.



Figur 4 Eksempel på kuldebrotabell fra Byggdetaljer 471.017

Et alternativt tabelloppslag er presentert i Prosjektrapport 25 *Kuldebroer - Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*. Rapporten er utarbeidet av SINTEF Byggforsk og presenterer et forslag til dynamisk KuldebroAtlas, som er et dataark med kuldebroverdier for ulike konstruksjoner. Beregningene er utført med dataprogram for todimensjonal varmestrøm.

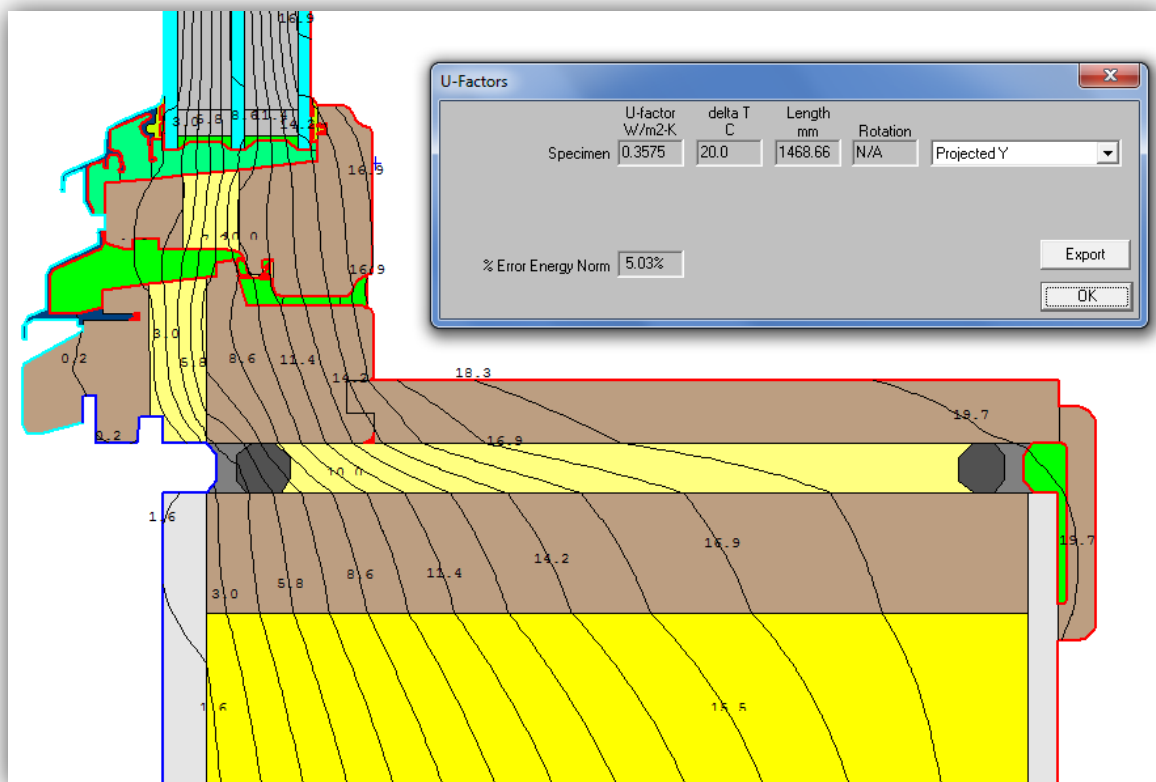
### Numerisk beregning

Den mest avanserte og nøyaktige metoden for beregning av kuldebroverdi er numerisk beregning ved hjelp av datamaskiner. Spesielle regler for beregning av tilleggsvarmetapet gjennom kuldebroer er gitt i den internasjonale standarden NS-EN ISO 10211.

Numeriske beregninger kan gjennomføres for to hovedgrupper konstruksjoner: konstruksjoner over bakken og konstruksjoner på grunnen og under grunnen. Likning 2 i denne rapporten angir beregningsmåten for konstruksjoner over bakken.

Det finnes en rekke dataprogrammer for numerisk beregning av varmestrøm og kuldebroverdier. Programmene kan beregne 2- og 3-dimensjonal varmestrøm i bygningskonstruksjoner og kan benyttes til å finne U-verdien til bygningsdeler, kuldebroverdier og temperaturfordeling i og på overflaten til konstruksjoner. Eksempler på slike programmer er THERM, HEAT2 og HEAT3.

Beregning av kuldebroverdi ved hjelp av dataverktøy tar utgangspunkt i total varmetransport gjennom et konstruksjonsutsnitt. Man beregner videre varmetapet gjennom konstruksjonene som er tilsluttet kuldebroen og trekker det fra totalt varmetap. Et eksempel på hvordan beregningene framstilles i THERM er vist i figuren under.



Figur 5 Eksempel på todimensjonal varmestrømsberegning i THERM



### 3 KULDEBROER VED VINDUSINNSETTING

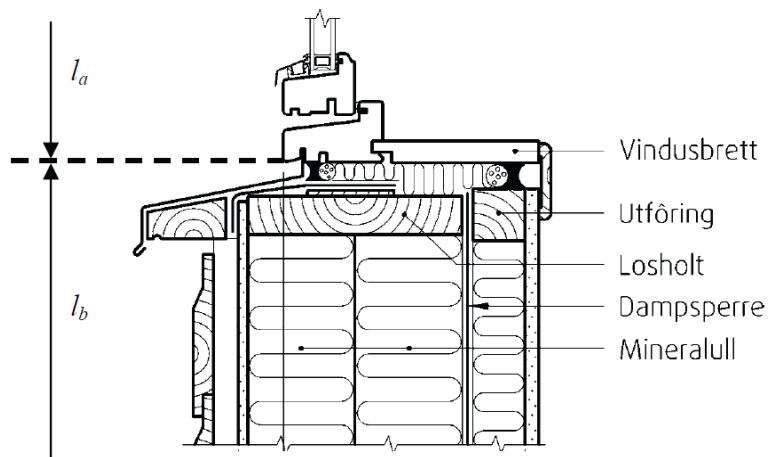
Vinduer har mange oppgaver. De sikrer dagslystilførsel og solvarmetilskudd, formidler visuell kontakt, gir ventilasjons muligheter og kan fungere som rømningsveg. Men vinduer står også for en stor del av det totale varmetapet for en bygning. Både vinduenes termiske egenskaper og kuldebroer ved vindusinnsetting vil ha betydning for bygningens energibalanse. Kuldebroer grunnet vinduer kan utgjøre et stort bidrag til varmetapet.

Betraktningene i dette kapittelet gjelder fasadevinduer, det vil si vertikale vinduer i ytterveggene.

#### 3.1 Arealer

I henhold til NS 3031 er det innvendig areal som skal brukes i varmetapsberegninger. Andre måter å måle opp på gir andre kuldebroverdier.

Figur 6 viser arealer som benyttes til beregning av transmissjonstap og kuldebroverdi for vindusinnsetting. Som angitt i NS 3031 skal vindusarealet inkludere arealet av karm og ramme. Det betyr at vinduets areal beregnes ut fra utvendige karmmåål. Mellomrommet mellom karm og losholt er inkludert i veggens areal. Man regner med en vegg høyde helt inn til underkant av vinduskarm.



Figur 6 Illustrasjon av vindusdetalj - arealfordeling. (Gustavsen, A. m.fl. 2008)

#### 3.2 Hva regnes med i kuldebroverdien

I veiledningen til TEK står det at kuldebroer som fremkommer gjennom konstruksjonsmåte, som stendere i en stenderverksvegg, er inkludert i U-verdien til vegg. Ut i fra dette er det naturlig at losholt og ekstra treverk som benyttes til forsterking rundt vinduer, også er med i veggens U-verdi. U-verdien til et vindu er et mål på varmetapet gjennom hele vinduet inkludert karm- og rammekonstruksjonen. Eventuelle kuldebroer i selve vinduet inngår i vinduets U-verdi.

Kuldebroverdien for vindusinnsetting gjenspeiler følgelig kun tilleggsvarmetapet gjennom monteringsfugen mellom vegg og vinduskarm. Dette varmetapet regnes inn i den normaliserte kuldebroverdien for det aktuelle bygget.

Kuldebroverdien for vindusinnsetting vil være forskjellig ved betraktning av bunn-, topp- og sidekarm. Det er vanlig å angi kuldebroverdien som beregnet veid middelvei for et kvadratisk vindu.

Tilleggsvarmestrømmen som går gjennom overgangen mellom vegg og vinduskarm påvirker verken vinduets eller veggens U-verdi.

### 3.3 Faktorer/forhold som kan ha innvirkning på kuldebroverdien

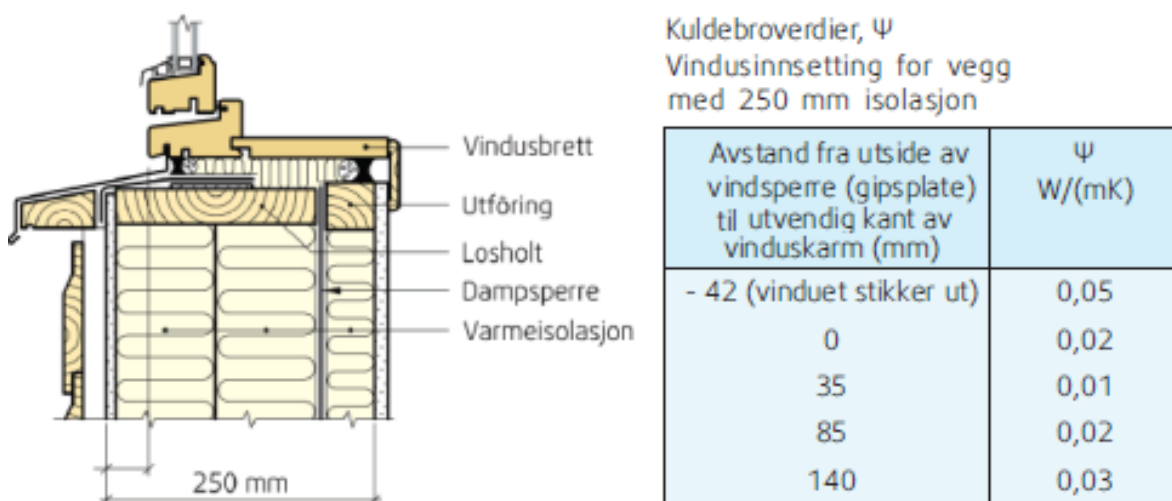
Kuldebroverdien for vindusinnsetting avhenger av en rekke faktorer. Ofte er det vanskelig å definere en klar grense mellom faktorene som påvirker kuldebroverdien mest og de med mindre betydning. I praksis vil kuldebroverdien bestemmes av et samspill av mange forhold.

De følgende underkapitlene gir en oversikt over aktuelle faktorer som kan ha innvirkning på kuldebroverdien, samt deres eventuelle betydning for kuldebroverdien.

#### 3.3.1 Vindusplassering

Vindusplassering og detaljer rundt vindusåpninger kan ha stor betydning for tilleggsvarmetapet på grunn av kuldebroer. Hvor i vegglivet vinduer plasseres vil også ha innvirkning på fuktmessige og arkitektoniske forhold, og ikke minst på bygningens vedlikehold. På grunn av vindusplasseringens komplekse virkning finnes det ikke en entydig løsning på den beste plasseringsmuligheten. Anbefalingene for vindusplassering kan derfor være motstridende, spesielt relatert til fukt og varmetap.

De forskjellige innsetningsmåtene vil gi forskjellig kuldebroverdi, siden varmen vil finne forskjellige veier gjennom vegg, avhengig av vindusplassering (Gustavsen, A. m.fl. 2008). Når hovedmålet er å minimalisere varmetapet og kuldebroeffekten, bør vinduer plasseres noenlunde midt i vegg. SINTEF Byggforsk anbefaler i Byggdetaljer 523.701 at vinduer plasseres i samme posisjon som varmeisolasjonssjiktet. Dette kan være problematisk å tolke, spesielt for tykkere vegger med bredere isolasjonslag. En mer detaljert beskrivelse av vindusplasseringens betydning for kuldebroverdien er gitt i Byggdetaljer 471.015. Figuren under viser plasseringsmuligheter for et trevindu i en bindingsverksvegg, samt kuldebroverdiene for de ulike plasseringene.



Figur 7 Eksempler på vindusplassering og respektive kuldebroverdier. (Byggdetaljer 471.015)

Som det framgår av figuren, er den gunstigste plasseringen av vinduet 35 mm fra utside av vindsperre for denne detaljen. En plassering ytterst i vegglivet gir størst kuldebroverdi, men også et helt inntrukket vindu er ugunstig for denne konstruksjonen.

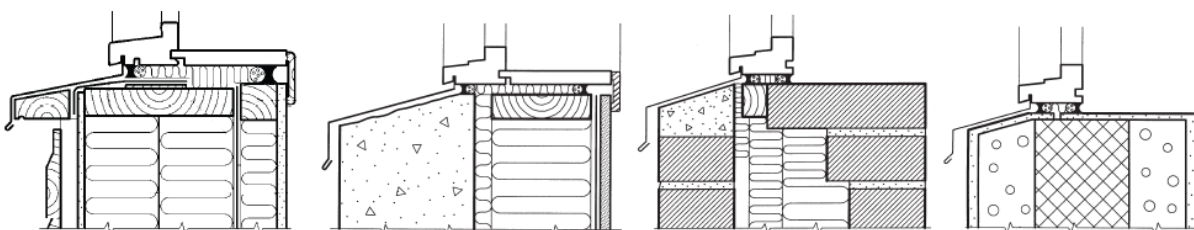
I hvilken grad vindusplassering påvirker kuldebroverdien vil avhenge av vindustype og veggkonstruksjon. Detaljer i monteringsfugen vil også ha betydning, spesielt for plassering lenger inn i vegglivet, da det inngår flere materialer, for eksempel bord for heving av vindu.

### 3.3.2 Konstruksjonstype

Tilleggsvarmetapet gjennom kuldebroer rundt vinduer påvirkes av veggkonstruksjonen. Veggens U-verdi er med i beregning av lineær kuldebroverdi etter likning 2. Den mest avgjørende faktoren er i denne sammenheng tykkelsen på isolasjonslaget i vegg. Kuldebroenes relative betydning øker med økende isolasjonstykkelse i konstruksjonen (Novakovic, V. m.fl. 2007).

Bredden på isolasjonslaget er bestemmende for veggens totale tykkelse, i tillegg til veggens U-verdi. En tykkere vegg medfører større eksponeringsareal i overgangen mellom vegg og vindu. Dette kan tilrettelegge for flere plasseringsmuligheter for vinduet, men kan også føre til fukt- og varmetekniske utfordringer. På grunn av den større differansen mellom veggbredde og karmbredde i tykkere vegger, vil det alltid være større tilslutningsdel av vegg som er eksponert utvendig eller innvendig (eller begge). Dette vil kunne påvirke varmetransporten gjennom konstruksjonen som helhet og samtidig ha innvirkning på kuldebroverdien.

Konstruksjonstypen kan ha betydning for den lineære varmegjennomgangskoeffisienten. Vegger kan utføres med ulike bærekonstruksjoner og i ulike materialer, se figur 8. Dette vil naturlig påvirke tilslutningsdetaljene i overgangen mellom vegg og vinduet. I enkelte veggkonstruksjoner kan det være nødvendig å redusere isolasjonslaget ved utsparingskanten. Andre veggkonstruksjoner krever ekstra tetning i monteringsfugen. Et eksempel på det er vegg av lettklinkerblokker, hvor blokkvangene må vindtettes i smygene med slemming eller pussing. Selv om pussen ikke er gjennomgående, vil varmestrømmen likevel være større.



Figur 8 Vindusinnsetting i ulike veggkonstruksjoner. (Byggdetaljer 523.702)

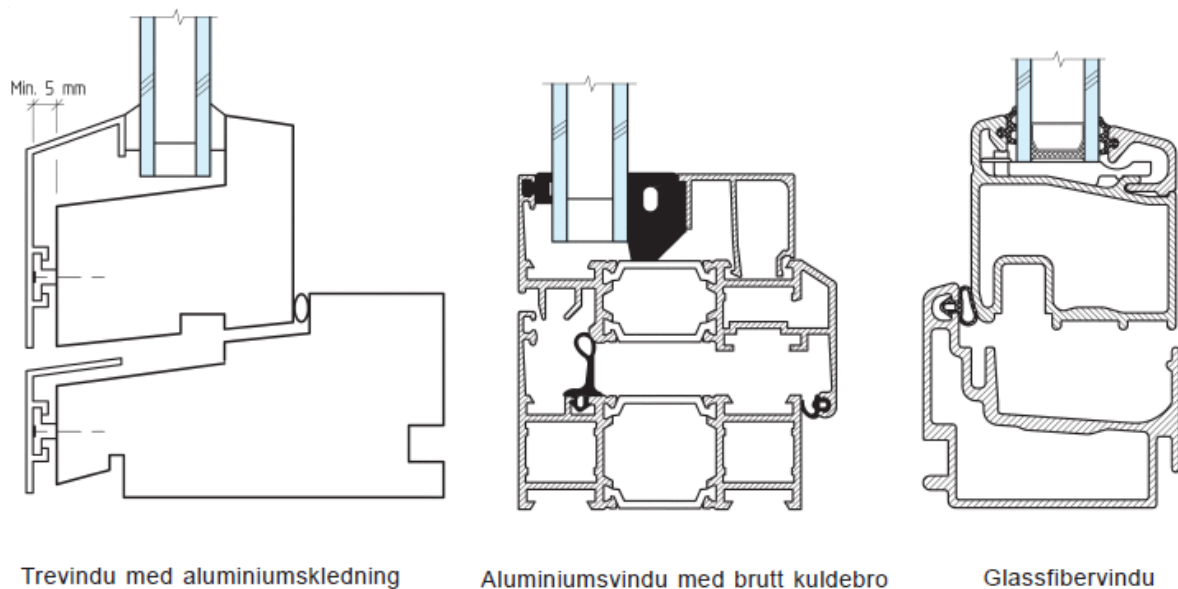
### 3.3.3 Vindustype

Vinduets U-verdi, bredde og høyde på karm og ramme er noen av de faktorene relatert til vindustype som har betydning for kuldebroverdien. U-verdien til vinduet er direkte relatert til kuldebroverdien. Dette framgår av likningen for beregning av lineær kuldebroverdi (likning

2). Vinduets U-verdi påvirkes av hvordan karm- og rammeprofilene er utformet. En forutsetning for meget lav U-verdi er at karm- og rammeprofilene er isolert.

Bredden på karmen bestemmer størrelsen på kontaktflaten mellom vinduet og monteringsfugen. Karmbredden vil derfor ha innvirkning på hvordan varmetransporten går gjennom tilslutningsdetaljen. En bredere karm vil antakelig gi en lengre vei for varmestrømmen, forutsatt at karmen har gode varmeisolerende egenskaper.

Det finnes en rekke forskjellige karm- og rammeprofiler. Deres ulike egenskaper og de forskjellige monteringsprinsippene kan ha innvirkning på kuldebroverdien. Figur 9 illustrerer tre av en stor variasjon av vindusprofiler.



**Figur 9** Eksempler på karm- og rammeprofiler. (Byggetaljer 533.102)

Ulike vindustyper ut i fra åpningsmuligheter og innmonteringsmåter kan også ha betydning for den lineære varmegjennomgangskoeffisienten. I hovedsak har dette sammenheng med hvordan karmen er montert til veggen og mulighetene for isolering av mellomrommet mellom vegg og vindu. Slagvinduer er side-, topp- eller bunnhengslet og åpnes utover eller innover. Et vindu med utadslående ramme vil kunne gi større fleksibilitet med tanke på innvendig isolering av monteringsfugen, mens et innadslående vindu gir bedre muligheter for utvendig isolering. Et fast vindu, som ikke kan åpnes, kan isoleres om ønskelig både utvendig og innvendig helt inn til vindusruten. Mulighetene for montering og isolering er svært varierte også for svingvinduer, skyvevinduer og glidehengslede vinduer. De fleste isoleringsløsninger kan påvirke både kuldebroverdien og varmemotstanden til karm og ramme.

### 3.3.4 Materialvalg og oppbygging av monteringsfugen

Kuldebroverdien for vindusinnsetting er et mål på tilleggsvarmetapet gjennom tilslutningsfugen. Materialene i selve fugen og detaljene på ut- og innside av fugen vil ha betydning for

størrelsen av dette varmetapet. Monteringsfugen kan oppbygges på ulike måter, men enkelte detaljer vil alltid være til stede i en eller annen form. Slike detaljer er isolasjon, vann- og lufttettingsmaterialer, utvendig vannbrett og vannbrettbeslag og vindusbrett/fôring for lukking av fugen.

Høyden på monteringsfugen og plassering av vindusbrett vil også ha innvirkning på kuldebroverdien. Fugehøyden under vinduskarmen vil være begrenset av hensyn til tetthet, men innvendig kan høyden på fugen økes til for eksempel overkant av karm. Dette vil, som nevnt tidligere, ha effekt over kuldebroverdien og vinduets U-verdi.

### 3.3.5 Kvalitet på innsetningsarbeidet

Vindusinnsetting, så vel som annet byggearbeid, kan være preget av feil. Både i prosjekteringsfasen og i byggefasen kan mangler og feil medføre dårlig kvalitet på vindusmonteringen. Feil tegningsgrunnlag og/eller dårlig utførelse kan forverre kuldebroene rundt vinduer.

En mulig kilde til prosessrelaterte feil er at personer opererer utenfor sitt kompetanseområde. Problemer kan forekomme også som følge av at de prosjekterende har utilstrekkelig kunnskap om byggeteknikk og bygningsfysikk (varme-, luft- og fukttransport).

## 3.4 Konsekvenser av kuldebroer ved vindusinnsetting

Noen av konsekvensene som er beskrevet i underkapittel 2.3 er også representative for kuldebroer ved vindusinnsetting. Hovedkonsekvensen her vil imidlertid være varmetap. Kuldebroer rundt vinduer kan ha stor innvirkning på totalt varmetap og normalisert kuldebroverdi for en bygning. For et typisk småhus med et vindusareal på ca. 20 % av husets bruttoareal, kan kuldebroer ved vindusinnsetting utgjøre omtrent halv parten av det samlede varmetapet gjennom husets kuldebroer (Gustavsen, A. m.fl. 2008).

Uansett hvordan man velger å dokumentere oppfyllelse av energikravene i TEK (ved energitiltak eller samlet netto energibehov), vil kuldebroer rundt vinduer spille viktig rolle. Ved bruk av energitiltak skal kuldebroer vurderes spesielt opp mot kravet til normalisert kuldebroverdi,  $\Psi''$ . I mange tilfeller kan særlig kuldebroer ved vindusinnsetting være årsaken til at man ikke kommer innenfor kravet på  $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  for småhus eller  $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  for øvrige bygg.

Den lineære varmegjennomgangskoeffisienten for innsetting av vinduer i typiske norske boliger kan være  $0,05 \text{ W}/(\text{mK})$ . I bygninger der det har vært fokus på å minimalisere effekten av kuldebroer, kan kuldebroverdien for vindusinnsetting reduseres til  $0,01 \text{ W}/(\text{mK})$ . Selv om verdien kan betraktes som liten, vil kuldebrobidraget for alle vinduer i en bygning kunne bli meget stor.

De forbedrede termiske egenskapene til moderne vinduer gjør det mulig å øke vindusarealet. Økt vindusareal betyr flere vinduer eller større vindusomkrets og dermed flere løpemeter per potensielle kuldebroer.

## 4 TILTAK FOR Å REDUSERE KULDEBROVERDI FOR INNSETTING AV VINDUER.

Dette kapittelet omhandler noen vurderinger og løsninger som kan redusere kuldebroverdien for vindusinnsetting. Litteraturstudien refererer til norsk og internasjonal praksis.

### Vindusplassering

SINTEF Byggforsk er en viktig aktør når det gjelder forskning rundt kuldebroproblematikken. I ulike rapporter og i Byggforskserien er vindusplassering omtalt som en viktig parameter for minimering av kuldebroer. Forskjellige plasseringer av vinduet i vegglivet vil gi store variasjoner i kuldebroverdi. Byggdetaljer 471.015 gir et eksempel på sammenhengen mellom vindusplassering og kuldebroverdi for en bindingsverksvegg med 250 mm isolasjon. Veggen er utført med utvendig luftet kledning, gipsplate som vindsperre og innvendig fôring. Tilslutningsdetaljen er illustrert i figur 7. Kuldebroverdiene for de ulike innsettingsmåtene er vist i tabellen under.

**Tabell 3 Kuldebroverdi for forskjellige vindusplasseringer. (Byggdetaljer 471.015)**

Avstand fra utside av vindsperre til utvendig kant av vinduskarm [mm]	- 42	0	35	85	140
Kuldebroverdi, $\Psi$ [W/(mK)]	0,05	0,02	0,01	0,02	0,03

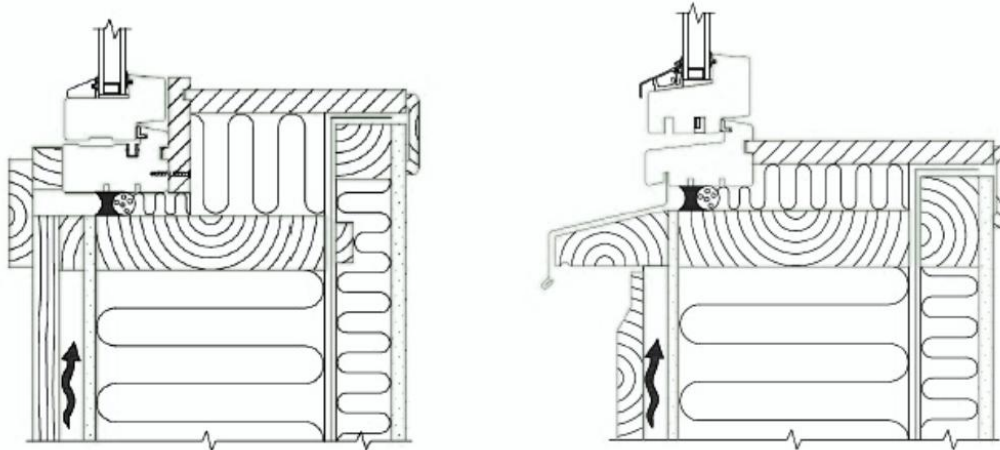
Det viser seg at en plassering mot midten av veggen (35 mm avstand) vil være gunstigst med tanke på minimering av kuldebroverdien. Et vindu plassert ytterst i vegglivet (- 42 mm avstand/vinduet stikker ut) gir fem ganger større kuldebroverdi for denne konstruksjonen. Det er viktig at valgt løsning for vindusplassering vurderes grundig, da den har betydning for mange andre forhold i tillegg til varmetekniske. Vindusplassering har betydning for fukttekniske forhold, soloppvarming, slitasje, vedlikeholdsbehov, og ikke minst for byggets arkitektoniske uttrykk.

Den optimale vindusplasseringen i følge noen andre byggforsksblad avviker fra den anbefalte løsningen over. En mulig årsak til uoverensstemmelsene kan være at byggdetaljerbladene er fra eldre dato. Byggdetaljer 523.701 og 523.702 som handler om innsetting av vinduer i bindingsverksvegger og mur- og betongvegger anbefaler at vinduer plasseres slik at oppbretten i bakkant av vannbrettbeslaget kommer akkurat på utsiden av vindsperren. Dette vil i følge bladene plassere vinduet i samme posisjon som varmeisolasjonssjiktet og gi lavest varmetap. En slik plassering tilsvarer - 42 mm i tabellen over.

### Innvendig isolering

Kuldebroverdien for et vindu plassert ytterst i vegglivet kan reduseres med innvendig isolering. I Prosjektrapport 46 *Moderne trevinduer - funksjonalitet, levetid og design* fra SINTEF

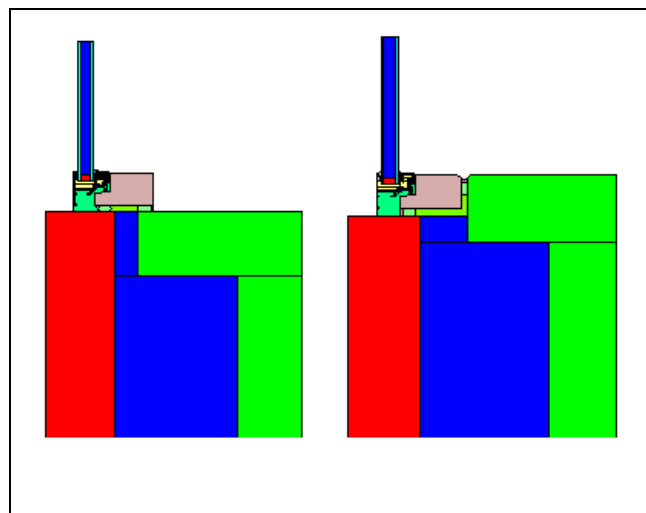
Byggforsk er det gjort beregninger for en vindusløsning med en innvendig isolert karm og ramme (Arnesen, H. m.fl. 2009). Denne løsningen innebærer at man monterer mer isolasjon på varm side av karm- og rammedelen, ved å flytte fôringene lenger inn mot ruten. En skisse av utførelsesprinsippet er vist i figur 10.



**Figur 10** Prinsipp av innvendig isolert vindu. Til venstre snitt av topp- og sidekarm, til høyre snitt av bunnkarm. (Arnesen, H. m.fl. 2009)

Beregningene for denne løsningen er gjennomført for et vanlig utadslående tolags trevindu, som er trukket 20 mm ut fra utvendig side av vindsperren. Resulterende kuldebroverdi er 0,01 W/(mK) (i sammenlikning er kuldebroverdien for en tilsvarende uisolert tilslutningsdetalj 0,03 W/(mK)). Innvendig isolering av karm- og rammeprofilene vil både gi en reduksjon av kuldebroen rundt vinduet og en lavere U-verdi for hele vinduet.

Et tilsvarende prinsipp for vindusinnsetting er studert av Laustsen, Noye og Svendsen (2009). Deres arbeid viser at varmetapet gjennom monteringsfugen kan reduseres dersom vinduskarm og vegg plasseres i samme høyde. Det studerte vinduet har en karm- og ramme-konstruksjon utørt i blandete materialer. Karmen er av tre og rammen er laget av aluminium og plast. Figur 11 viser en vanlig og en alternativ tilslutning mellom vindu og vegg. I detaljen til høyre, har vinduet samme plassering i forkant av veggen, men veggkonstruksjonen er ført opp og dekker hele vinduskarmen.

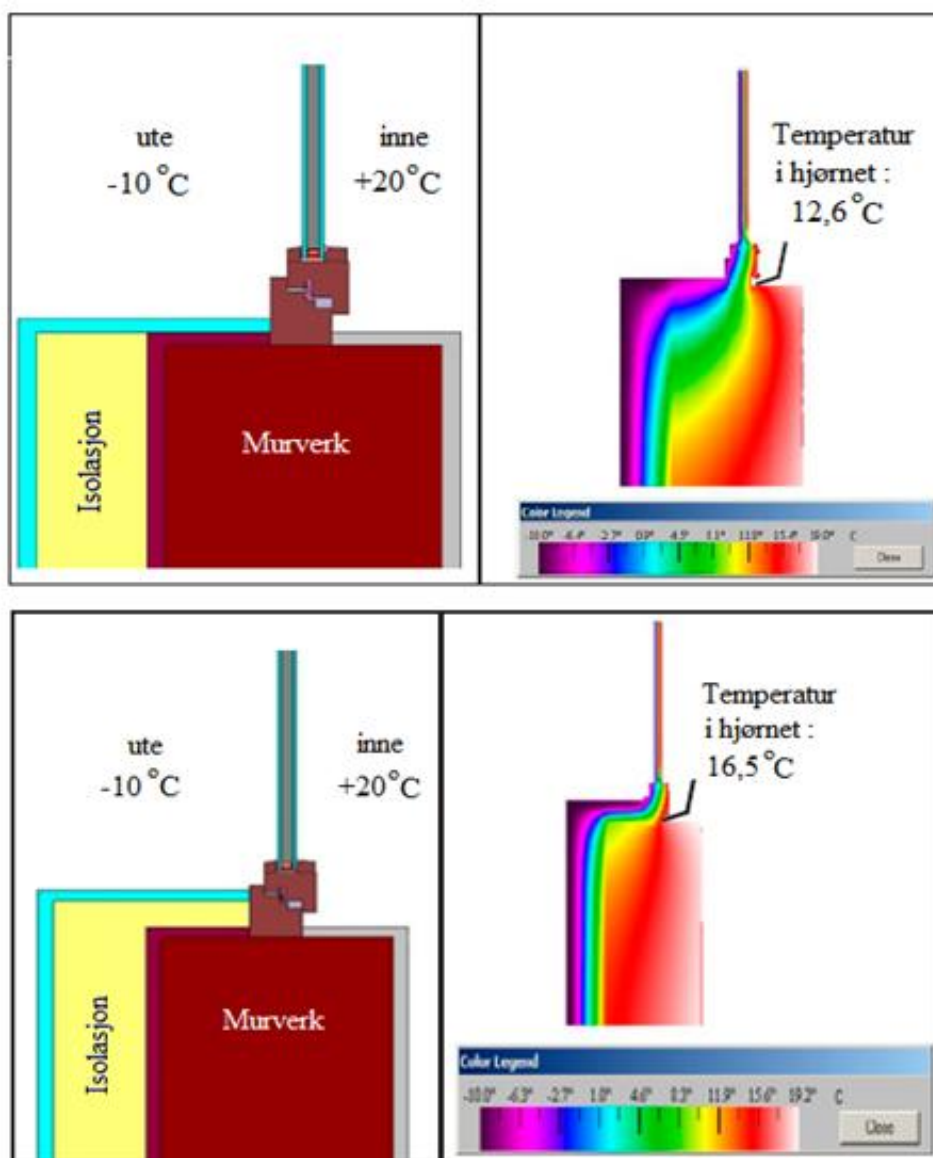


**Figur 11** Ulike løsninger for tilslutning mellom vindu og vegg. (Laustsen, Noye og Svendsen 2009).



## Utvendig isolering

Lokal isolering av kuldebroene rundt vinduer er også mulig utført utvendig. Eksempelet vist under er tatt fra en tysk rapport og illustrerer hvordan man kan isolere overgangen mellom vindu og vegg (Feist, W. og Born, R. 2012). Skissen øverst viser tilslutning mellom et vindu og en utvendig isolert murvegg. I skissen under er isolasjonen ført over veggen opp til overkant av vinduskarm. Temperaturfordelingen for de to løsningene viser at utvendig isolering av monteringsfugen er gunstig med tanke på minimering av kuldebroeffekten.

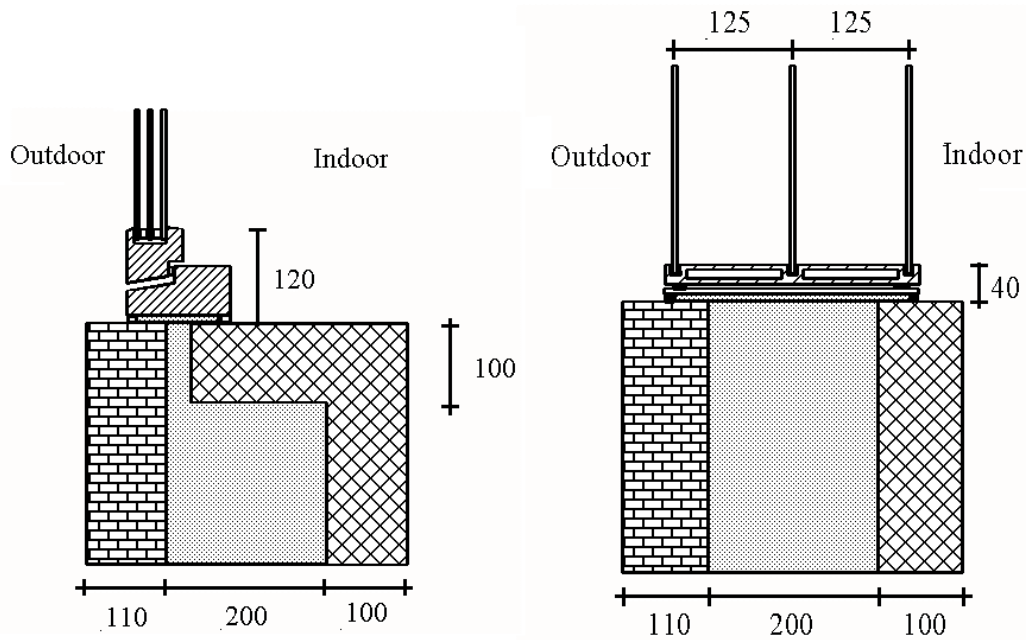


Figur 12 Prinsippskisse av innsetting av vindu i utvendig isolert murvegg. Alternativ plassering av isolasjonen i skissen til høyre. (Feist, W. og Born, R. 2012)

## Nytt vinduskonsept - alternative karm- og rammekonstruksjoner

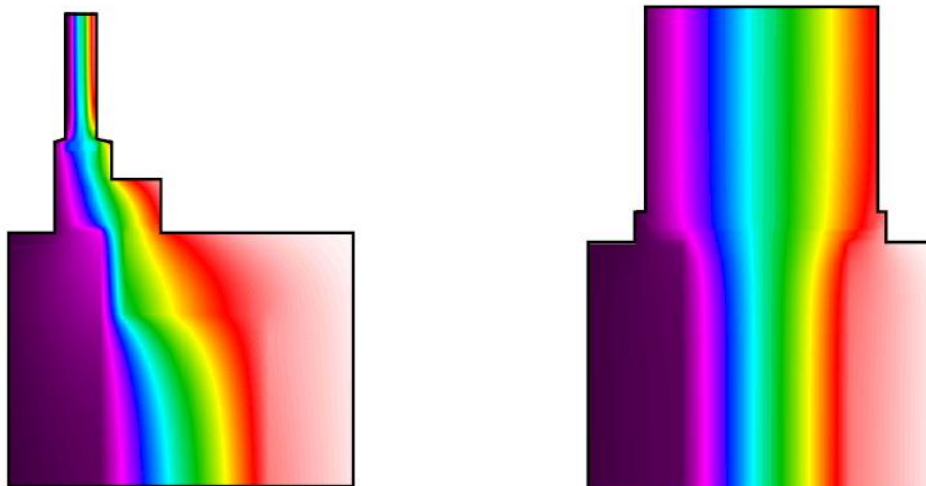
Schultz og Svendsen (2000) har utarbeidet et nytt konsept for vinduer med bedre energiytelse, se illustrasjon i figur 13. Konseptet baseres på en smal karm- og rammekonstruksjon og sikter på blant annet minimering av kuldebroer ved vindusinnsetting.





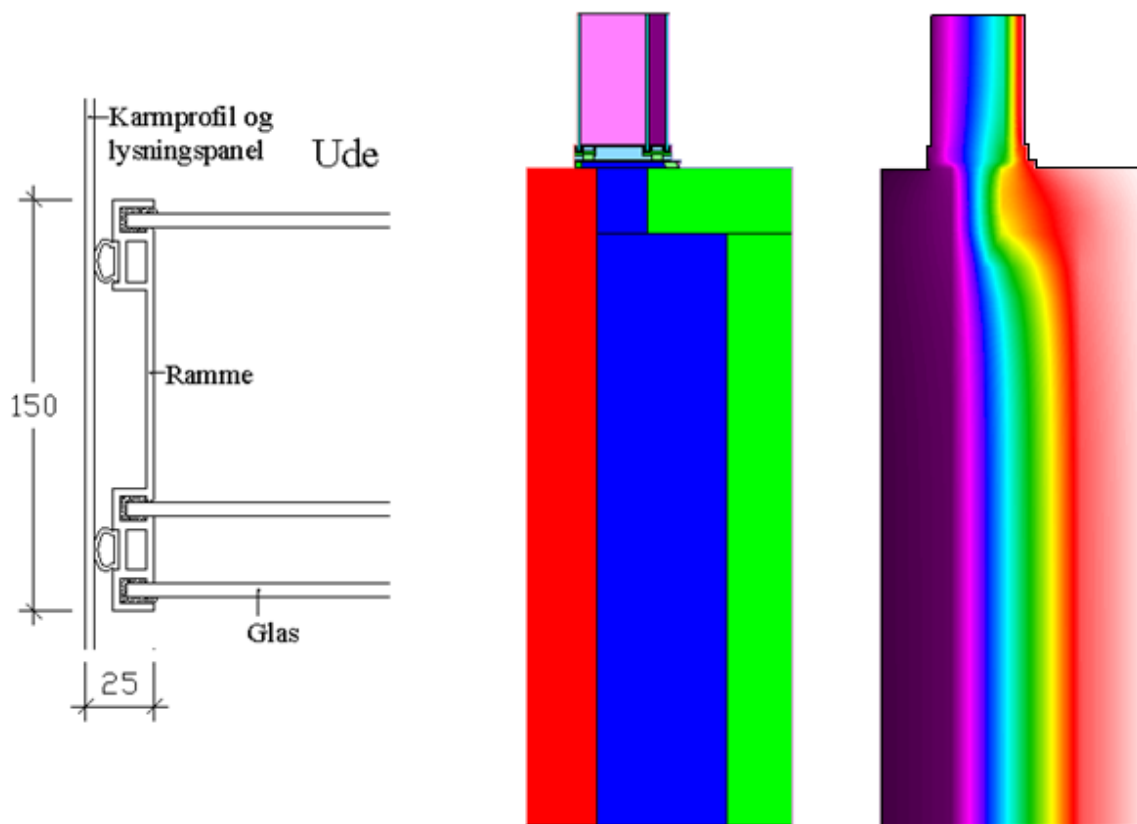
Figur 13 Tradisjonell og ny vindusdesign. (Schultz og Svendsen, 2000 og Schultz, 2002)

Det nye vinduet har tre lag glass, med avstand mellom glassene på 125 mm. Hulrommene i ruten er luftfylte og det er anvendt to harde lavemisjonsbelegg på det ytterste og innerste glasslaget. Rammekonstruksjonen er integrert i ruteløsningen. Den økte glassavstanden gir en svært bred vinduskarm som svarer til tykkelsen på isolasjonslaget i en godt isolert veggkonstruksjon. Varmetapet omkring vinduet reduseres, som følge av en mer ensartet temperaturfordeling gjennom både vegg og vindu. Temperaturforløpet ved overgangen fra vegg til vindu er nesten uforstyrret og kuldebroeffekten er nesten eliminert. Dette er illustrert i figur 14.



Figur 14 Fargeplott av temperaturfordeling for tradisjonell (til venstre) og ny vindusdesign (til høyre). (Schultz, J.M. 2002)

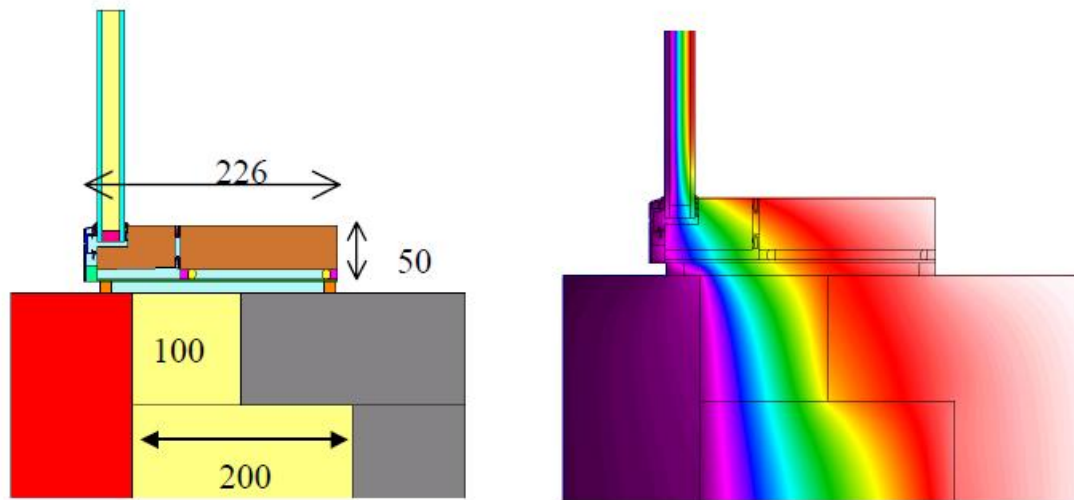
En tilsvarende vindusprototyp er vurdert av Laustsen, Noye og Svendsen (2009). Prototypen er kalt *kombinasjonsvindu*, fordi den kombinerer rute og ramme til en samlet konstruksjon, se figur 15.



Figur 15 Karm- og rammeprofil til kombinasjonsvindu. Temperaturfordeling for veggtilslutning. (Laustsen, Noye og Svendsen, 2009)

Kombinasjonsvinduet har en bred og lav karm-rammeprofil, som er utført i glassfiberarmert polyester. Det er plass til tre glass i rammen, hvorav to er plassert innerst som tolags rute og et enkelt glass er plassert ytterst. Denne vindusløsningen gir også en gunstig temperaturfordeling i konstruksjonen.

To dokumenter, Kristiansen og Schultz (2002) og Laustsen og Svendsen (2005), beskriver også et vindu med bred og lav karm- og rammekonstruksjon. Vinduet er utviklet ved Danmarks tekniske universitet og gir en energimessig bedre tilslutning mellom vindu og vegg, oppnådd gjennom en utvidelse av karmbredden. Vindusrammen er forskjøvet fremover, slik at ramme og karm er på et nivå, se figur 16. Karm- og rammeprofilen er laget av tre, dekket med aluminium, og bunnfestet til en 3 mm bred PVC plate. Ruten som er benyttet har to lag lavenergiglass og lavemisjonsbelegg på det innvendige glasset. Hullrommet mellom glassene er 15 mm bred og 90 % argon fylt.



Figur 16 Smal ramme- og karmløsning. (Kristiansen og Schultz 2002).

## 5 VARMESTRØMSBEREGNINGER

Det overordnede målet med varmemestrømsberegningene var å utvikle et grunnlag for vurdering av kuldebroer ved vindusinnsetting. Ved hjelp av simuleringer i THERM 6.3 var det utarbeidet en parameterstudie som beskriver hvilke faktorer har betydning for kuldebroverdien og hvorvidt denne verdien kan reduseres.

Simuleringene ble utført for innsetting av NTECH Passiv vindu (NorDan) i ulike veggkonstruksjoner. Ruten i NTECH vinduet ble erstattet med et isolasjonspanel med varmekonduktivitet på 0,035 W/(mK). Simuleringene ble utført for bunnkarm.

### 5.1 Metode

Det ble gjort en forstudie for å få en oversikt over hvilke faktorer og i hvilken grad har innvirkning på kuldebroverdien. Forstudien basertes på simulering av innsetting av vindu i et homogent veggpanel. De følgende tre parametrene ble studert:

- veggtykkelse
- termisk konduktivitet til veggen
- veggens U-verdi

Hovedstudien undersøkte kuldebroeffekten ved tilslutning mellom vindu og reelle veggkonstruksjoner. Gjennom variasjon i ulike parametre kunne man se variasjonen i kuldebroverdi og bestemme påvirkningsgrad og eventuelt hvilke forhold som var mest avgjørende for kuldebroer ved vindusinnsetting. Med utgangspunkt i underkapittel 3.3 ble følgende parametre undersøkt:

- Vindusplassering
- Veggkonstruksjon
- U-verdi til veggen
- Karm/ramme løsninger
- Materialvalg og oppbygging av monteringsfugen
- Detaljer rundt monteringsfugen

#### 5.1.1 Beregningsverktøy

Varmestrømsberegningene i denne masteroppgaven er gjennomført ved hjelp av dataprogrammet THERM, versjon 6.3. THERM er et todimensjonalt elementmetode program som beregner stasjonær varmeledning og kompleks varmestrålingsutveksling (LBNL, 2011). Konstruksjonsgeometriene er varierte og ikke begrenset til rektangulære. THERM er beregnet på simulering av varmetransport i vindusrammer, men kan også benyttes til å beregne U-verdi til andre bygningsdeler. Programmet er utviklet ved Lawrence Berkeley National Laboratory i California, USA.

WINDOW er et dataprogram som anvendes vanligvis i forbindelse med beregninger gjennomført i THERM. Programmet beregner blant annet U-verdi, lystransmisjon og temperatur for overflatene til glassene i et vindusrute. Dataprogrammet WINDOW er imidlertid ikke benyttet i simuleringsarbeidet, ettersom beregningene er utført for et isolasjonspanel og ikke for en vindusrute.

### 5.1.2 Fremgangsmåte

Følgende prosedyre ble benyttet i beregningene:

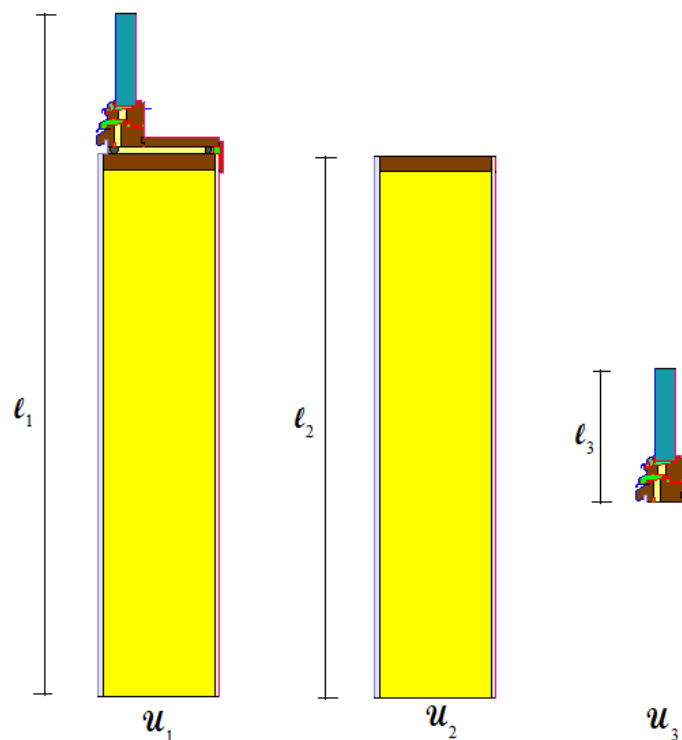
- 1) Ønsket konstruksjonsutsnitt tegnes i THERM. Veggkonstruksjonene tegnes med lengde på 1,2 meter.
- 2) Deretter beregnes varmestrømmen gjennom hele konstruksjonsutsnittet, hvor alle detaljer er inkludert.
- 3) Beregnet gjennomsnittlig U-verdi for hele konstruksjonsutsnittet multipliseres med lengden som U-verdien er beregnet for. Dette gir den lineære varmekoplingskoeffisienten,  $L^{2D}$ .
- 4) Konstruksjonene som er tilsluttet kuldebroen tegnes hver for seg selv og respektive U-verdier beregnes.
- 5) U-verdiene til de tilsluttende konstruksjonene multipliseres med konstruksjonenes lengde og produktene trekkes fra den lineære varmekoplingskoeffisienten, se likning (2).
- 6) Resultatet av differansen gir kuldebroverdien.

Simuleringsprosedyren er fremstilt visuelt i figuren til høyre. Fremgangsmåten er likt for alle beregninger og konstruksjoner. Beregnet varmetransport for hele konstruksjonen (detalj 1), inkluderer fugemasse, bunnfyllingslist og isolasjon i monteringsfugen mellom vegg og vindu. Beregnet U-verdi for veggen (detalj 2) er inklusive losholt. U-verdi for vinduet (detalj 3) er beregnet til underkant karm og ekskluderende vindusbrett.

Kuldebroverdien oppnås ved hjelp av likningen:

$$\psi = L^{2D} - U_2 \cdot l_2 - U_3 \cdot l_3$$

$$\text{hvor } L^{2D} = U_1 \cdot l_1$$



Figur 17 Simuleringsprosedyre i THERM

### 5.1.3 Grensebetingelser

Dette punktet angir viktige beregnings forutsetninger for simuleringsarbeidet. Grensebetingelsene var konstant og gjaldt for alle simuleringer. I simuleringene ble det benyttet en forenklet modell for grenseoverflatene. Det vil si at det ble tatt hensyn til kun temperatur og overgangsmotstand. Strålingsdata ble ikke inkludert.

#### Avgrensning av konstruksjonen

Tilslutningsdetaljene, som er vist i figur 17, hadde konstante mål i alle beregninger. Det ble regnet med en vegghøyde  $l_2 = 1,2$  m og en vindushøyde  $l_3 = 0,3$  m.

#### Overgangsmotstander

Overgangsmotstandene benyttet i denne studien er som angitt i NS-EN ISO 6946. Det ble tatt hensyn til varmestrømsretning som vist i tabell 4. For vegg med luftet utvendig kledning ble det benyttet en utvendig overgangsmotstand,  $R_{se}$  på  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  på utside vindspærre (Byggdetaljer 471.008). Snittplanene ved isolasjonspanelet og den tilstøtende veggen er adiabatisk, i henhold til NS-EN ISO 10077-2.

Tabell 4 Varmeovergangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946:2007, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]

Overflate	Varmestrømsretning		
	Oppover	Horisontalt	Nedover
Innvendig, $R_{si}$	0.10	0.13	0.17
Utvendig, $R_{se}$	0.04	0.04	0.04

#### Temperaturer

Temperaturene på grenseoverflatene er i henhold til NS-EN ISO 10077-2, Tillegg D.2. Disse er angitt i tabell 5. Temperaturdifferansen gjennom konstruksjonen er  $\Delta T = 20$  K.

Tabell 5 Temperaturer, NS-EN ISO 10077-2

Grenseoverflate	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Innvendig	20
Utvendig	0

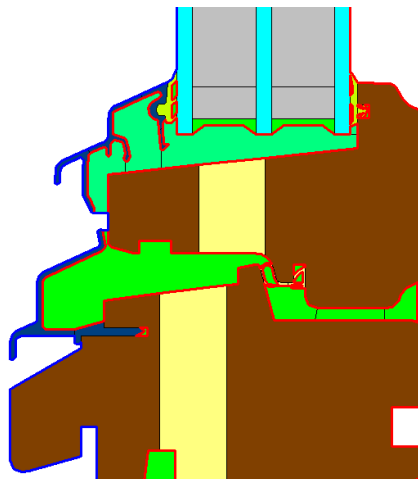
## 5.2 Beskrivelse av konstruksjonene og materialdata

### 5.2.1 Vindu

Beregningsmodellene ble utført for NTECH passiv vindu (NorDan, 2010), se figur 18 og 19. Vinduet har isolerte karm og ramme og en meget lav U-verdi. U-verdi for hele vinduet er ifølge produsenten  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . NTECH vinduet har 3-lags glass med 2 emisjonsbelegg og argongass mellom alle glass. Rutens samlet bredde er 44 mm og U-verdi for ruten er  $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Karm og ramme er utført i vakuumpregnet furu. Begge er isolert med 17 mm polyuretanskum (PUR).



Figur 18 NTECH passiv vindu, (NorDan 2010)



Figur 19 NTECH vindu - THERM modell

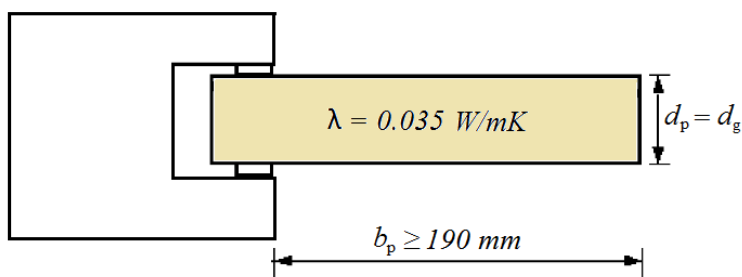
Dimensjonene på karm- og rammekonstruksjonen er vist i tabell 6. Disse er brukt ved alle simuleringer. For hulrommene mellom karm og ramme er det benyttet en hulrom modell (Cavity Model) etter ISO 15099. Frame Cavity NFRC 100 er benyttet for indre hulrom mellom karm og ramme. Frame Cavity Slightly Ventilated NFRC 100 er benyttet for hulrom mellom ramme og rute, som er i kontakt med de eksterne omgivelsene. Emissiviteten til flatene som støter opp mot de luftfylte hulrommene i modellen er 0,9, i henhold til NS-EN ISO 10077-2.

Tabell 6 Karm/ramme dimensjoner (bunnkarm)

NTECH passiv vindu - innadslående	Dybde/bredde [mm]	Høyde [mm]
Karm	105	55
Ramme	80	57

### 5.2.2 Isolasjonspanel

I alle simuleringer er vindusruten i NTECH vinduet erstattet med et isolasjonspanel med varmekonduktivitet  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ , se figur 20.



Figur 20 Profil med isolasjonspanel i henhold til NS-EN ISO 10077-2, Tillegg C.

Tykkelsen på isolasjonspanelet er lik rutens tykkelse på 44 mm og panelets synlige lengde er 190 mm i henhold til NS-EN ISO 10077-2. En synlig panellengde på 190 mm er tilstrekkelig for ruter med en tykkelse på inntil 60 mm (NS-EN ISO 10077-2:2003).

Bruk av et isolasjonspanel i stedet for en reell rute ble valgt på grunn av tekniske problemer med dataprogrammet THERM. Isolasjonspanelet benyttes vanligvis for beregning av kuldebroeffekten ved sammenføring av karm/ramme profiler med ruter etter NS-EN ISO 10077-2. Erstatningen av ruten med et isolasjonspanel medførte endring i vinduets U-verdi. U-verdi til vinduet (bunnkarm, ramme og 190 mm synlig isolasjonspanel) ble beregnet til 0,82 W/(m<sup>2</sup>K). Beregnet kuldebroverdi ble likevel ansett som realistisk og gjeldende for denne løsningen.

### 5.2.3 Veggkonstruksjoner

Beregningsmodellene ble utført for ulike veggkonstruksjoner. Ved bestemmelse av varmeledningsevnen til veggens isolasjonssjikt ble det tatt hensyn til at sjiktet i enkelte vegger består av både isolasjon og bærekonstruksjon. Tilpassing av isolasjonens konduktivitet ble basert på veggens U-verdi, som er angitt i Byggdetaljer 471.012. Referanse U-verdiene tar ikke hensyn til tilleggsvarmetapet gjennom konstruksjonsforsterkningene rundt vindusåpninger (for eksempel ekstra treverk).

For bindingsverksvegger ble det regnet med stendere i avstand c/c 0,6 m og med 9 % treandel for stendere med bredde 36 mm, og 12 % for stendere med bredde 48 mm (Byggdetaljer 471.012). Denne treandelen for vegger omfatter toppsvill, bunnsvill og stendere. I praksis vil spikerslag, losholter, ekstra stendere og forsterkninger rundt vindusåpninger ofte gjøre treandelen høyere (Edvardsen og Ramstad, 2007).

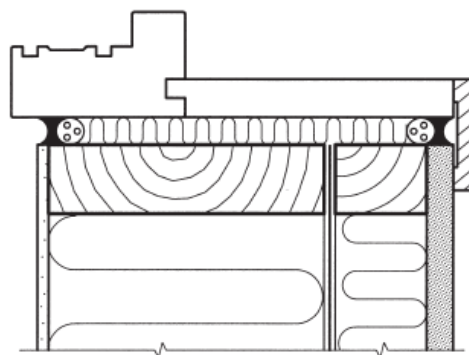
For vegger av teglstein og lettklinkerblokker ble det regnet med en referanse U-verdi fra Byggdetaljer 471.012, som tar hensyn til kuldebrovirkning i fugene. Liggende fuger ble derfor ikke tegnet i modellene. Noen referanse U-verdier ble hentet fra Murkatalogen, anvisning P1 og P8.

Vegg med utvendig luftet kledning ble tegnet i THERM ekskluderende kledning og luftlag. Dette betyr at konstruksjonen ble tegnet til utside av vindspærre, men effekten av den luftede kledningen ble bevart ved bruk av en overgangsmotstand på 0,13 m<sup>2</sup>K/W.

### 5.2.4 Tilslutningsdetaljer

Oppbygging av monteringsfugen ble basert på en rekke henvisninger i Byggforskserien, se figur 21. Valgte detaljløsninger ble tilpasset veggkonstruksjoner og variert vindusplassering.

Hulrommet mellom vindu og vegg var isolert med mineralull i beregningsmodellene, med unntak av de tilfellene hvor fugeisolasjonen var en simuleringsparameter. Det ble benyttet mineralull med varmekonduktivitet på 0,037 W/(mK).

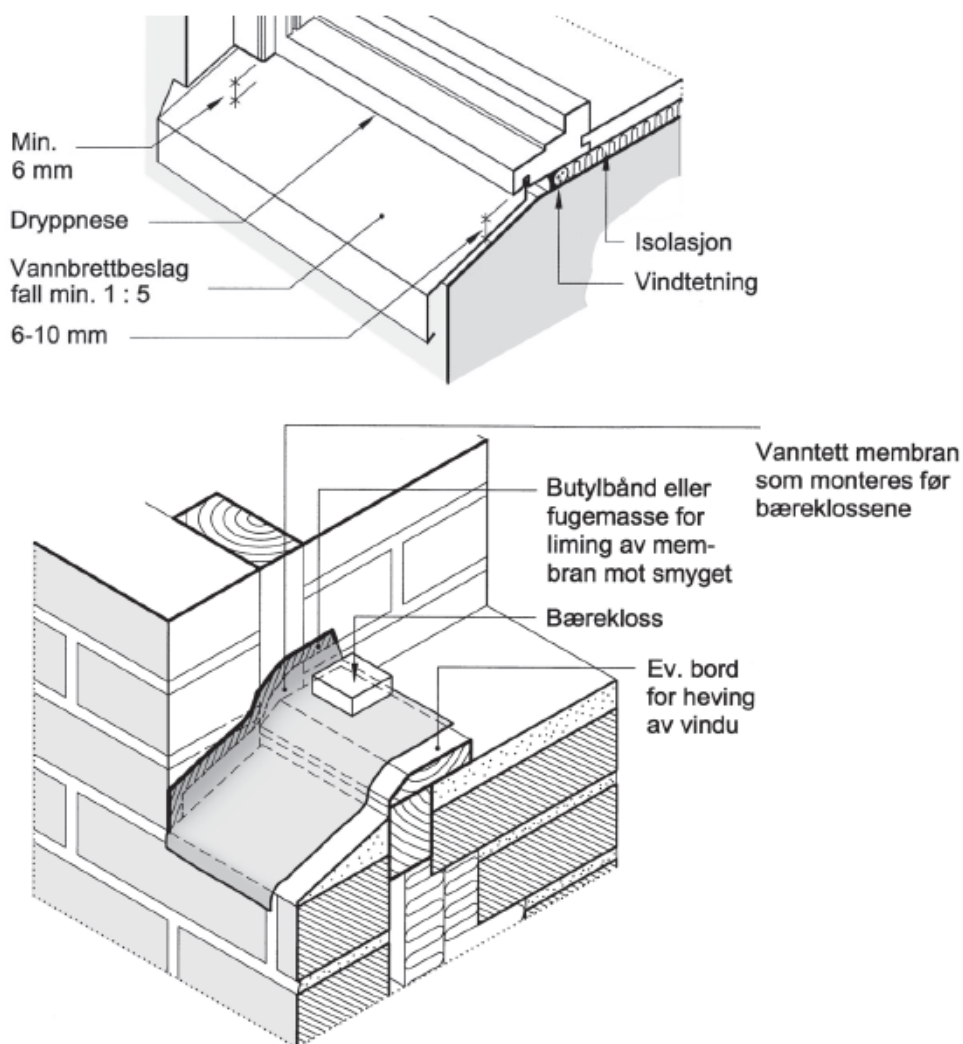


Figur 21 Prinsippskisse av monteringsfuge. (Byggdetaljer 523.701)



Innvendig tetning av fugen ble utført ved hjelp av elastisk fugemasse og bunnfyllingslist, se prinsippskisse i figur 21. I enkelte beregninger ble det brukt dekklist som innvendig skjerming av fugen.

Regn- og lufttetning av monteringsfugen ble utført etter prinsippet for totrinns tetning. Det ble antatt at fugen var dekket utvendig av en regnskjerm (beslag). Ytre lufttetning ble utført ved hjelp av elastisk fugemasse lagt mot bunnfyllingslist. Vannbrett og vannbrettbeslag ble ikke tatt med i beregningsmodellene. Deres betydning for fugeoppbyggingen ble imidlertid tatt i betraktning. For et inntrukket vindu, betydde dette bruk av bord for heving av vinduet, for å opprettholde minimums fallet på vannbrettet og beslaget. Detaljer rundt vanntetning og heving av vindu er vist i figur 22.



**Figur 22 Beslag og tetningsprinsipper. (Byggdetaljer 523.702)**

Ved oppbygging av tilslutningsdetaljene, ble det tatt hensyn til at enkelte vegger krever ekstra tetning i smyget, i form av puss eller slemming. Slike veggkonstruksjoner var utført i lettklinkerbetong og porebetongblokker.

I alle simuleringer ble effekten av fôringen (for lukking av monteringsfugen) medregnet ved kuldebroverdi-beregningene. Denne effekten ble ikke tatt med i beregning av vinduets U-verdi, selv om et høyere plassert vindusbrett ville påvirke karmens U-verdi.

### 5.2.5 Materialdata

Materialdataene benyttet i beregningene er hovedsakelig hentet fra NS-EN ISO 10456 og Bygdetaljer 471.010. Tabell 7 presenterer varmekonduktivitet og densitet for materialene benyttet i denne studien.

Tabell 7 Materialdata

Materialer	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Konduktivitet [W/(mK)]
Mineralull	10 - 200	0,037
Polyuretanskum (PUR)	20 - 65	0,03
Trevirke (gran, furu)	500	0,13
Trevirke	700	0,18
Gipsplate	700	0,21
Gipsplate	900	0,25
Betong	2200	1,65
Betong (armert med 2 % stål)	2400	2,5
Lettklinkerblokker (fuktbeskyttet)	900	0,31
Lettklinkerblokker (utvendig over terreng)	900	0,37
Porebetong, elementer og blokker (fuktbeskyttet)		0,13
Porebetong, elementer og blokker (utvendig over terreng)		0,14
Tegl, mangehullstein 108 mm (R = 0,16 m <sup>2</sup> K/W)	1600	0,675
Puss og mørtel (kalk, sand)	1600	0,8
Puss og mørtel (sement, sand)	1800	1,0
Aluminiumlegeringer	2800	160
Bunnlist		0,037
Gummi, Butyl	1200	0,24
Gummi, Etylenpropylendienmonomer (EPDM)	1150	0,25
Luftlag 20 mm, uventilert. (horisontal varmestrøm) R = 0,18 m <sup>2</sup> K/W		0,11

### 5.3 Resultater og drøfting

I det følgende er resultatene av en rekke simuleringer i THERM presentert. De fleste av beregningene er presentert i form av tall for kuldebroverdi,  $\Psi$ , angitt med tre desimaler. Noen utvalgte resultater er presentert i diagram/figur form i dette kapittelet og i Vedlegg 3.

#### 5.3.1 Forstudie

Det ble gjort beregninger av kuldebroverdi for innsetting av vindu i et homogent veggpanel, se figur 23. Hensikten med beregningene var å få en oversikt over hvilke faktorer, relatert til veggkonstruksjonen og vindusplassering, har innvirkning på kuldebroverdien.

Tre parametre, relatert til veggpanelet, ble undersøkt: varmekonduktivitet, tykkelse og U-verdi. Hver av disse ble holdt konstant, mens de andre to varierte, i henhold til likningen:

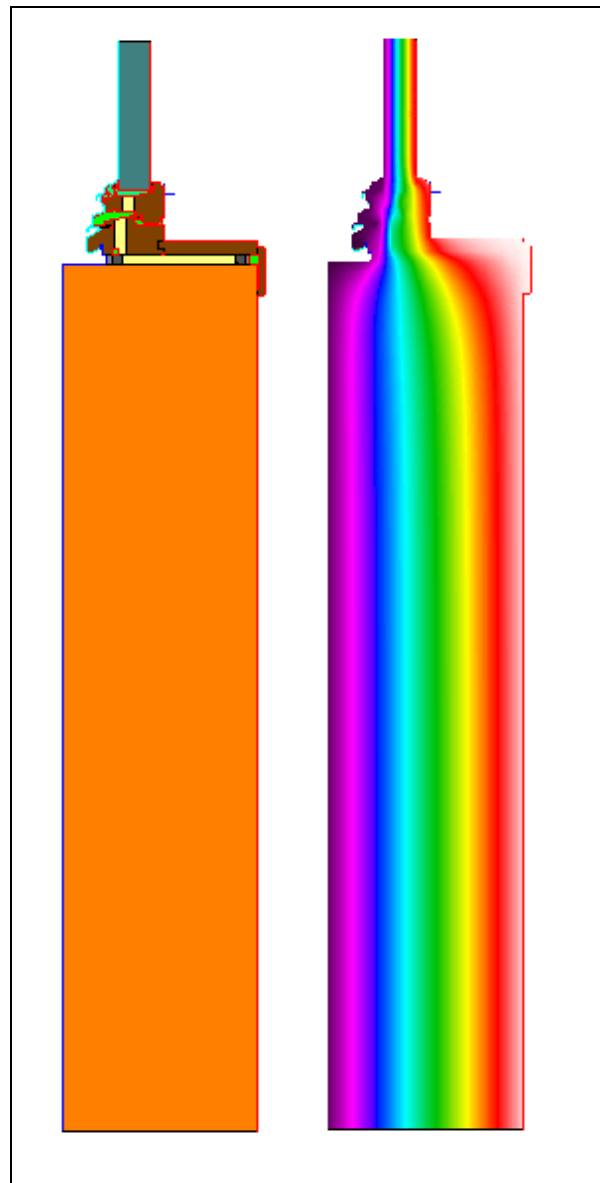
$$U_p = \frac{\lambda_p}{d_p}$$

Det ble antatt at veggpanelet representerer en vegg med utvendig luftet kledning. Derfor ble det benyttet en overgangsmotstand på  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  på utside av panelet.

Simuleringene i forstudien ble utført for tre vindusplasseringer i vegglivet. Det ble regnet med avstander på  $-42 \text{ mm}$ ,  $00 \text{ mm}$  og  $+35 \text{ mm}$  fra utside av panelet til utvendig kant av vinduskarm.

Resultatene av beregningene er presentert i diagramform på de neste sidene. Konkrete verdier fra forstudien er ikke tatt med i dette kapittelet. Et eksempel på hvordan beregningene ble gjort i et regneark, er imidlertid vist i Vedlegg 2.

De horisontale aksene i de tre diagrammene er valgt med tanke på økende varmemotstand (tykkelse) til veggpanelet.

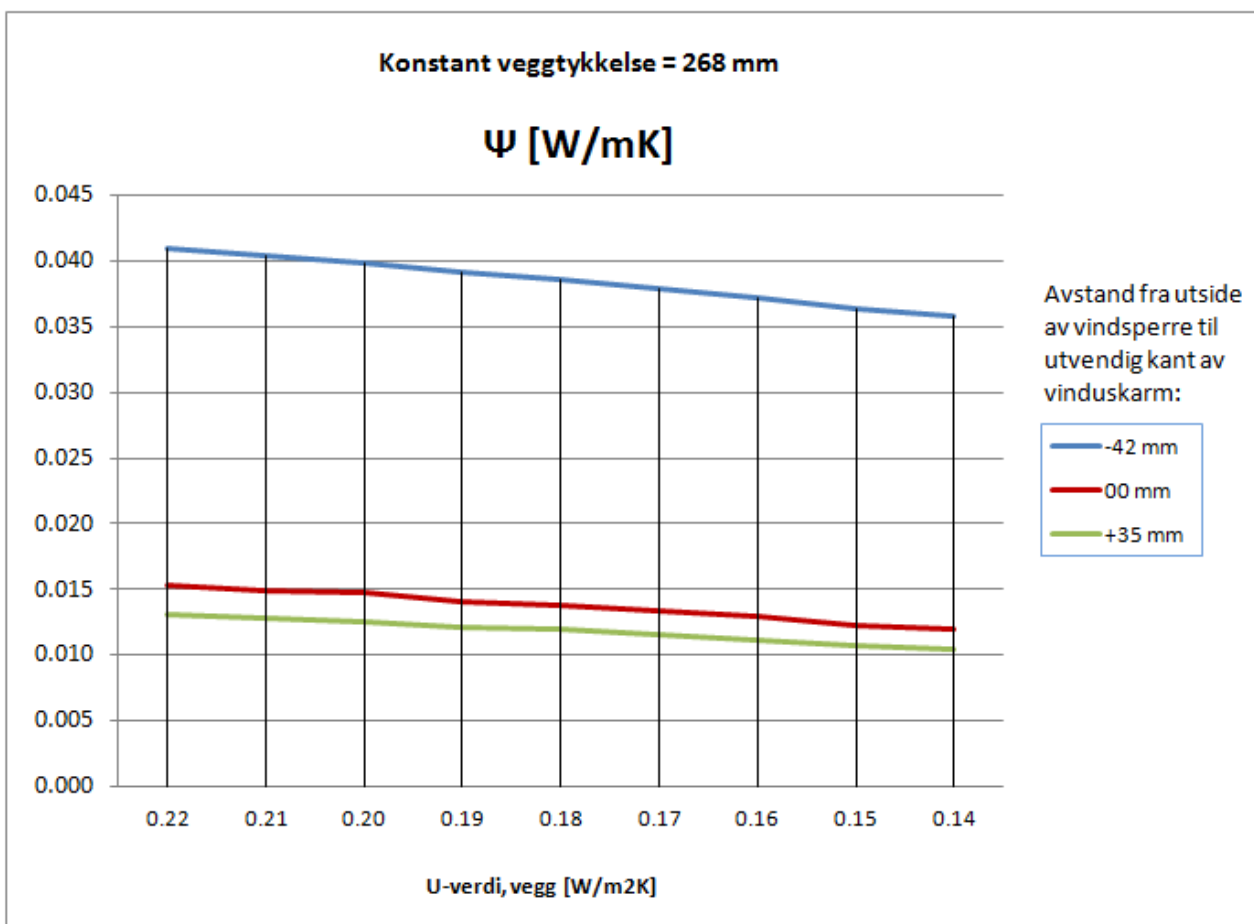


Figur 23 Innsetting av vindu i et homogent veggpanel og temperaturfordeling.

Figur 24 viser variasjon av kuldebroverdi som følge av endring i varmekonduktivitet og U-verdi til veggpanelet. Tykkelsen på panelet var 268 mm, ekskluderende utvendig kledning. Til sammen ble 27 simuleringer utført - 9 for hver av de tre plasseringene.

Som det kommer frem av diagrammet er det stor sprang i kuldebroverdi-området for vindusplassering ytterst i vegglivet. Forskjellen i kuldebroverdi mellom denne plasseringen og de to andre er i størrelsesorden 0,025 W/(mK). Kuldebroverdi-forløpene for de tre vindusplasseringene er imidlertid nesten parallelle. Dette betyr at variasjon av de studerte parametrene gir samme effekt.

Endring av U-verdi til panelet fra 0,22 til 0,14 W/(m<sup>2</sup>K), og tilsvarende endring i konduktivitet fra 0,0625 til 0,039 W/(mK), ga en liten endring i kuldebroverdi. Den relative endringen i kuldebroverdi var 0,005 W/(mK) for et vindu som stikker ut, og enda mindre for et inntrukket vindu.

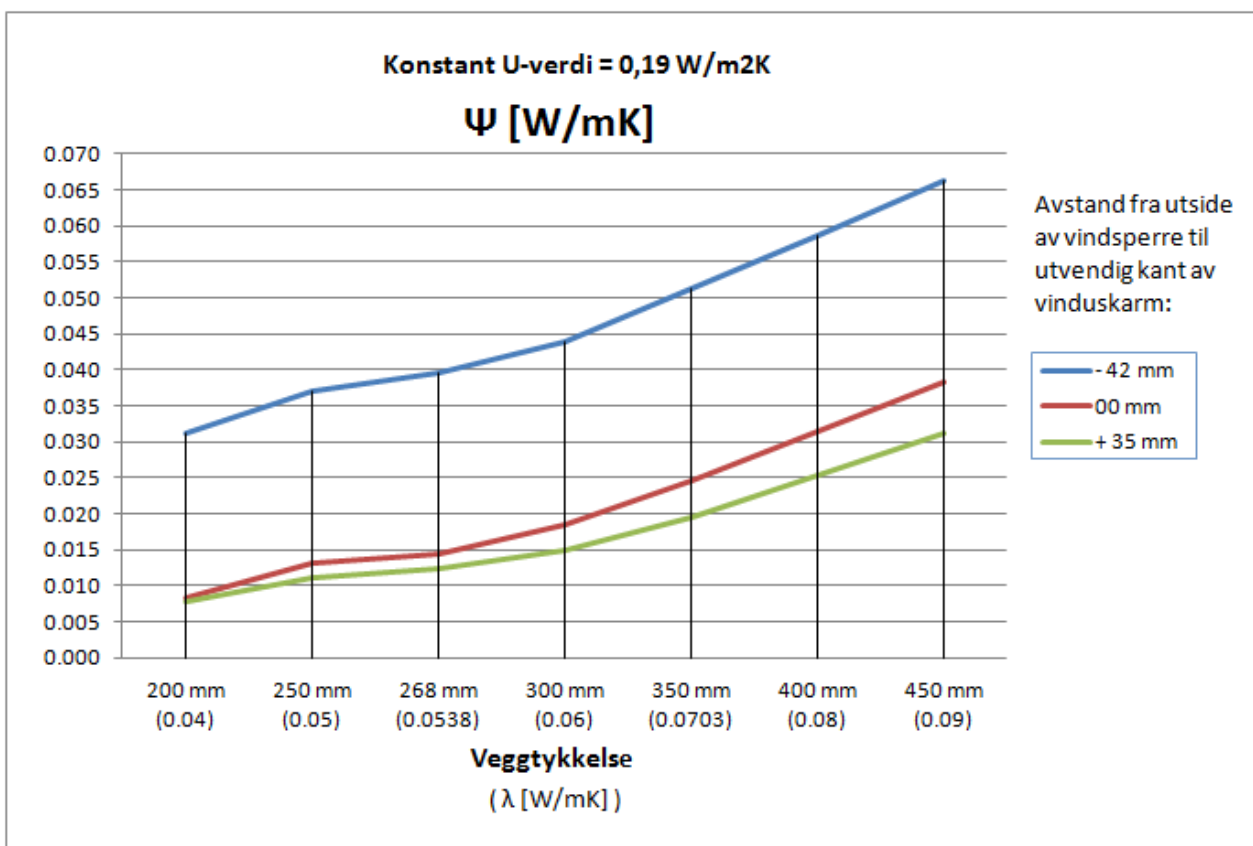


**Figur 24** Variasjon av kuldebroverdi som følge av endring i varmekonduktivitet og U-verdi til veggpanelet. Konstant paneltykkelse. Beregnet for tre vindusplasseringer.

Figur 25 viser variasjon av kuldebroverdi som følge av endring i paneltykkelse og varmekonduktivitet. U-verdi til veggpanelet er 0,19 W/(m<sup>2</sup>K). Det ble gjort 21 simuleringer - 7 for hver av de tre vindusplasseringene.

Vindusplassering i avstand -42 mm fra utside av veggpanel resulterte i høyere verdier i kuldebro-skalaen og skilte seg dermed igjen fra de andre to vindusplasseringene. Gjennomsnittlig kuldebroverdi-forskjell var  $0,03 \text{ W}/(\text{mK})$ . Kurvene for vindusplasseringer 00 mm og +35 mm var nesten sammenfallende. Den relative forskjellen i kuldebroverdi mellom de tre vindusplasseringene økte med økende paneltykkelse. Det vil si at betydningen av vindusplassering for kuldebroverdien var større for tykkere vegger.

Endring av veggtykkelse fra 200 til 450 mm ga en merkbar endring i kuldebroverdi for de tre vindusplasseringene. Kuldebroverdien økte med  $0,035 \text{ W}/(\text{mK})$  for et vindu plassert ytterst i vegglivet. Økningene for vindusplasseringer 00 mm og +35 mm, var henholdsvis  $0,030$  og  $0,023 \text{ W}/(\text{mK})$ .



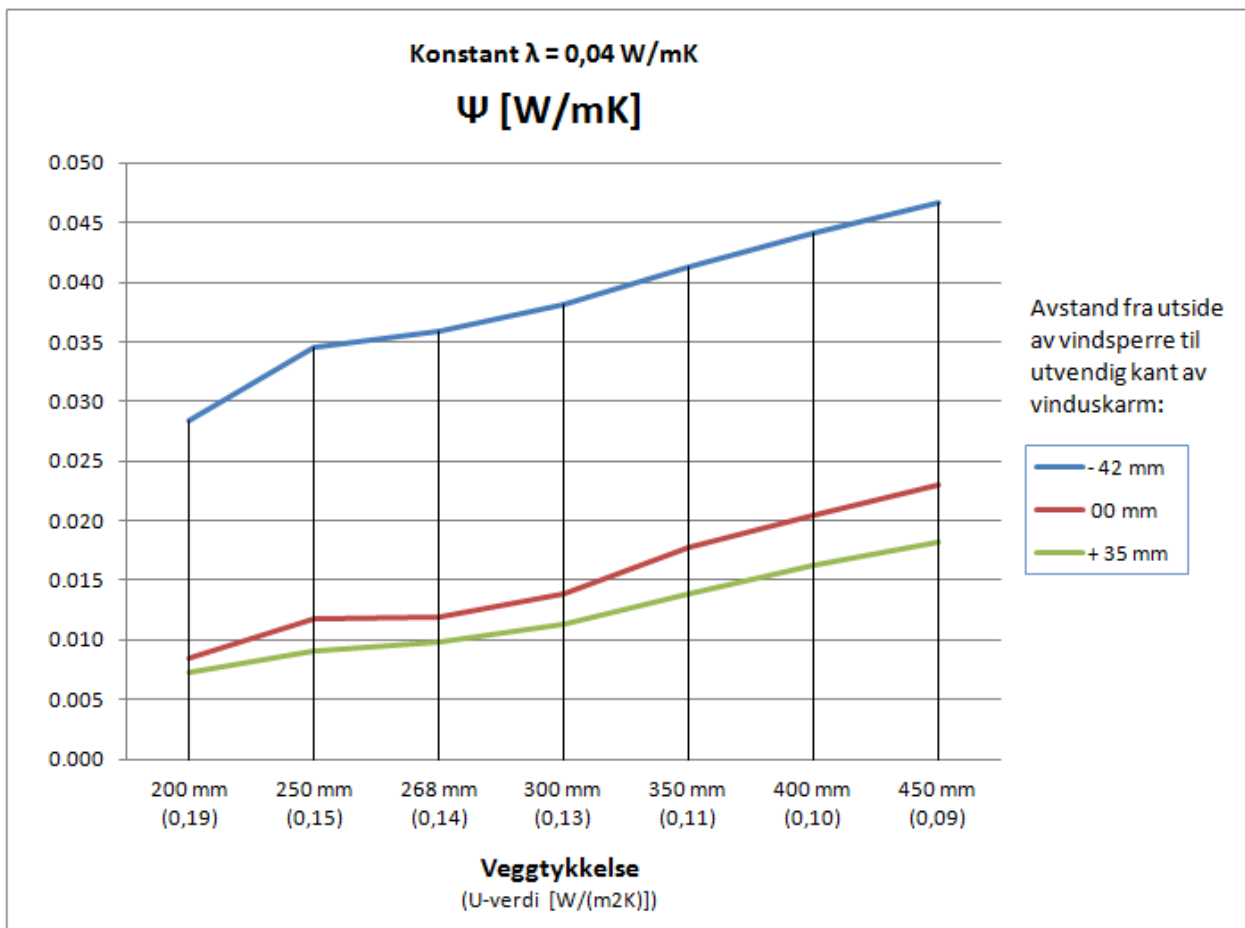
**Figur 25** Variasjon av kuldebroverdi som følge av endring i paneltykkelse og varmekonduktivitet. Konstant U-verdi til veggpanelet. Beregnet for tre vindusplasseringer.

Figur 26 presenterer den mest realistiske parametervariasjonen. Simuleringene ble gjort for et veggpanel med konstant varmekonduktivitet på  $0,04 \text{ W}/(\text{mK})$ . Veggtykkelsen ble variert og dette medførte endring av U-verdien og kuldebroverdi. Til sammen ble 21 simuleringer utført - 7 for hver av de tre vindusplasseringene.

Kurvene for kuldebroverdi i dette diagrammet er svært like disse i figur 25. Dette skyldes mest sannsynlig av at variasjonene ble gjort for identiske veggtykkelser. Kuldebroverdi-skalaen er imidlertid forskjellig. En endring av veggtykkelse fra 200 til 450 mm ga en økning

av kuldebroverdi på 0,018 W/(mK) for et vindu plassert ytterst i vegglivet. Tilsvarende økninger for vindusplasseringer 00 mm og +35 mm, var henholdsvis 0,015 og 0,011 W/(mK).

Innvirkningen av vindusplassering på kuldebroverdien kom fram også i denne parametervariasjonen. Vindu med plassering -42 mm fra utside av vindsperre skilte seg fra de andre to plasseringene med en gjennomsnittlig kuldebroverdi-forskjell på 0,023 W/(mK). Vindusplasseringens betydning for kuldebroverdien økte med økende isolasjonstykkelse i konstruksjonen.



**Figur 26** Variasjon av kuldebroverdi som følge av endring i paneltykkelse og U-verdi. Konstant varmekonduktivitet til veggpanelet. Beregnet for tre vindusplasseringer.

Resultatene av forstudien bekrefter at både veggtykkelse, varmekonduktivitet og U-verdi til veggen, har betydning for kuldebroverdien. De gjennomførte beregningene antyder på at veggtykkelsen har størst innvirkning på kuldebroverdien. Man kan likevel ikke trekke en generell konklusjon om hvilken av de studerte faktorene er viktigst, siden de påvirker hverandre. Resultatene viser også at vindusplassering har vesentlig effekt på kuldebroverdien, spesielt for et vindu plassert ytterst i vegglivet.

### 5.3.2 Hovedstudie

Resultatene av beregningene er presentert i de følgende underkapitlene, som er oppdelt etter konstruksjonstype. Oppsummering av resultatene er gitt i punkt 5.3.2.6. Enkelte parametervariasjoner ble utført for kun bindingsverksvegg av tre.

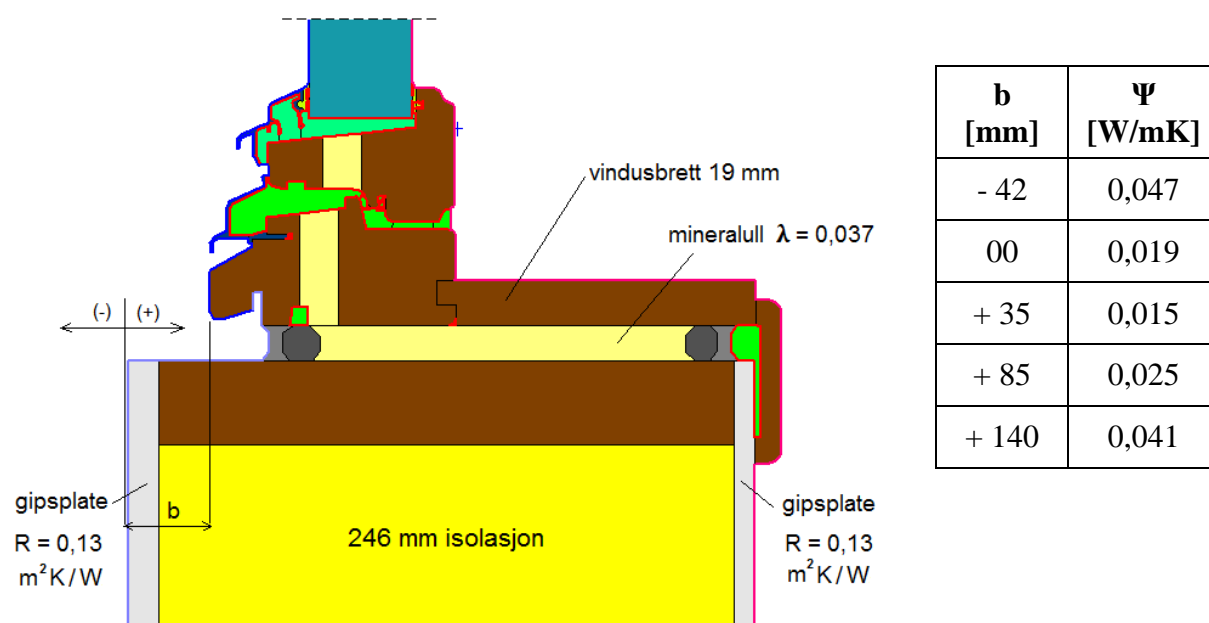
På bakgrunn av både forstudien og litteraturstudien ble vindusplassering ansett som en viktig parameter, som har avgjørende innvirkning på kuldebroverdien. Det ble derfor valgt å vurdere andre parametre i kombinasjon med variert vindusplassering. De fleste av parametrene ble simulert for flere ulike plasseringer av vinduet.

#### 5.3.2.1 Vegg av bindingsverk med utvendig luftet kledning

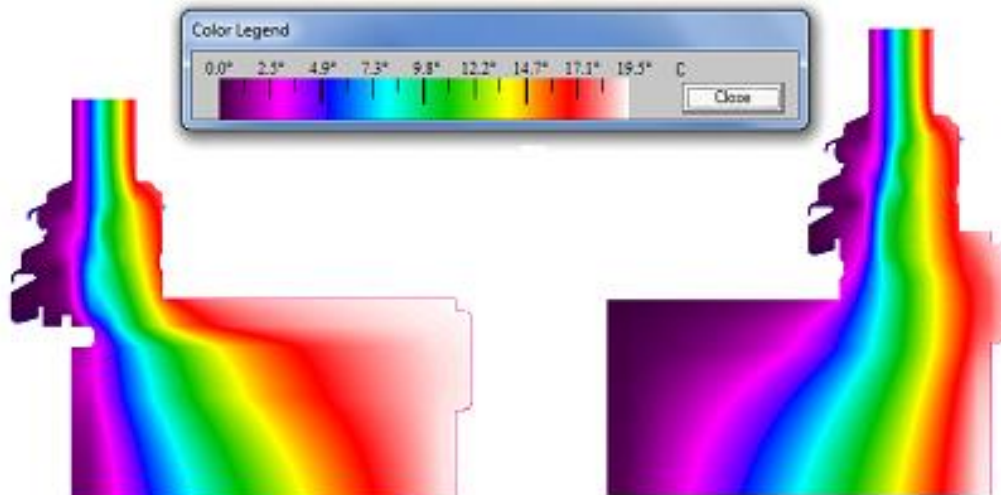
Alle simuleringmodellene for denne type vegg hadde tilsvarende oppbygging. Både isolasjonslag og treverk (losholt, utføring) ble tegnet kontinuerlig. Det vil si at det ikke ble tatt hensyn til eventuelle oppdelinger i materialene. Dampsperre ble ikke tegnet i simuleringmodellene, på grunn av dens neglisjerbar varmemotstand.

#### Vindusplassering

Det ble gjort simuleringer for fem vindusplasseringer i en bindingsverksvegg med 246 mm isolasjon. Veggens U-verdi var  $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Plassering av vinduet ble basert på avstand fra utside av vindusperre (gipsplate) til utvendig kant av vinduskarm,  $b$  [mm]. For plasseringer +85 og +140 mm ble det benyttet bord for heving av vindu med tykkelse 14 mm. Dette var nødvendig for å opprettholde kravet om minimums helning på vannbrettbeslaget (1:5) og avstand fra vannbrettbeslag til dryppnese karm (6-10 mm). Resultatene er vist i figurene under.



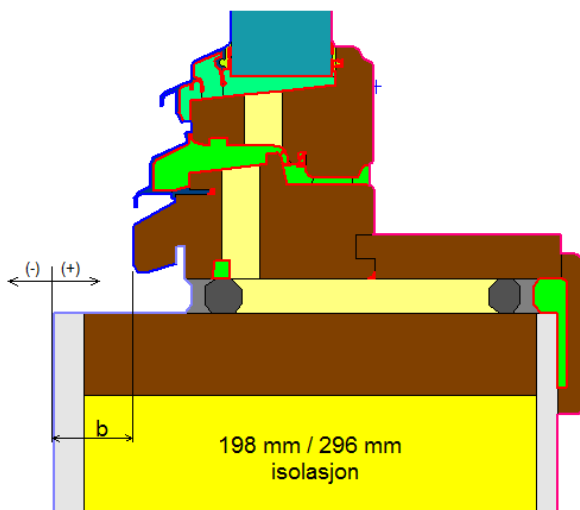
Figur 27 Skisse av beregningsmodell og kuldebroverdier for variert vindusplassering. Bindingsverksvegg med 246 mm isolasjon.



Figur 28 Temperaturfordeling for vindusplasseringer - 42 mm (til venstre) og + 140 mm (til høyre).

### Isolasjonstykkelse i veggen

To variasjoner av isolasjonstykkelse ble gjort. Vegg med isolasjonstykkelse på 198 mm hadde U-verdi 0,22 W/(m<sup>2</sup>K) og vegg med isolasjonstykkelse på 296 mm hadde U-verdi 0,15 W/(m<sup>2</sup>K). Kuldebroverdier ble beregnet for flere vindusplasseringer for hver av de to isolasjonstykkelsene, se figur 29.



	Isolasjonslag i vegg	
	198 mm	296 mm
<b>b</b> [mm]	<b>Ψ</b> [W/mK]	<b>Ψ</b> [W/mK]
- 42	0,040	0,052
00	0,014	0,024
+ 35	0,012	0,019
+ 85	0,031	0,025
+ 140		0,032

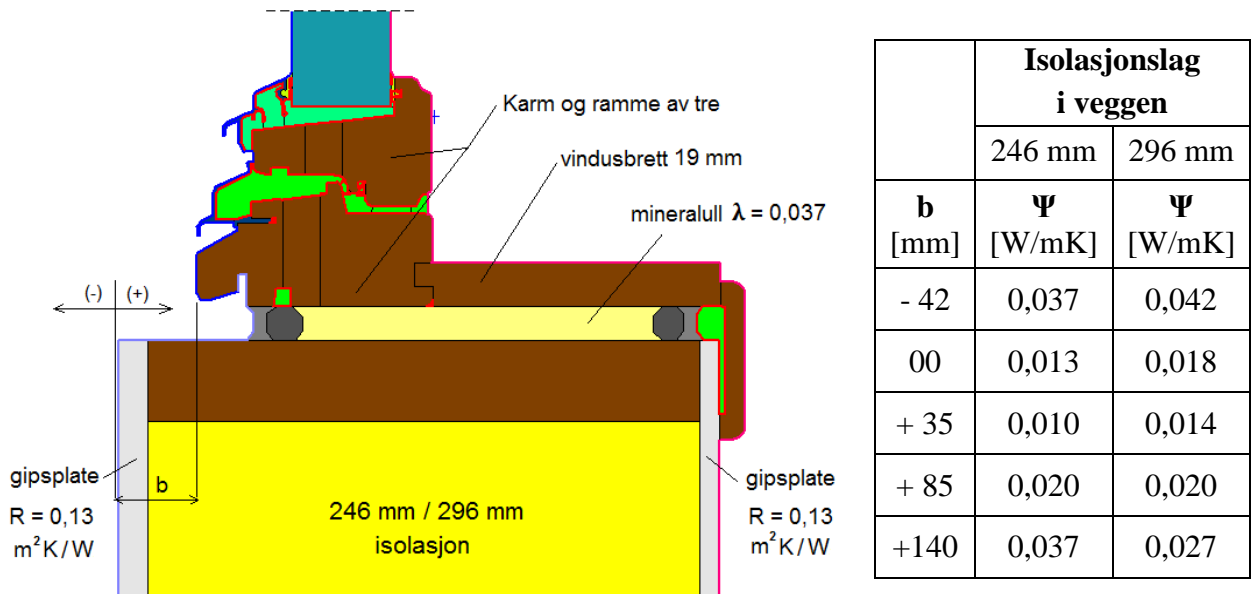
Figur 29 Skisse av beregningsmodell og kuldebroverdier for variert vindusplassering. Variert isolasjonstykkelse.

### Uisolert karm- og rammekonstruksjon

Beregninger av kuldebroverdi ble gjort for uisolerte karm og ramme. Vinduet hadde samme konstruksjonsoppbygging, men PUR-isolasjonen i karm og ramme var erstattet av tre. Denne endringen ble medregnet vinduets U-verdi. U-verdien økte fra 0,82 til 0,93 W/(m<sup>2</sup>K). Bereg-



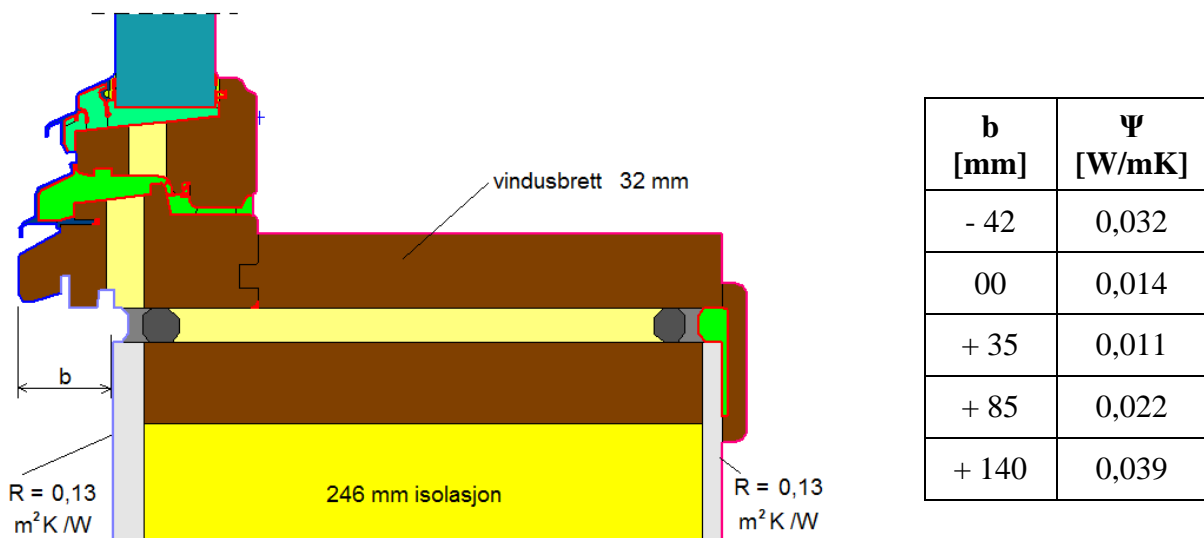
ningene ble gjort for varierte vindusplasseringer og for to isolasjonstykkelser til veggen. Resultatene er vist i figur 30.



Figur 30 Skisse av beregningsmodell og kuldebroverdier for uisolerte karm og ramme. Bindingsverksvegg med 246 mm og 296 mm isolasjon.

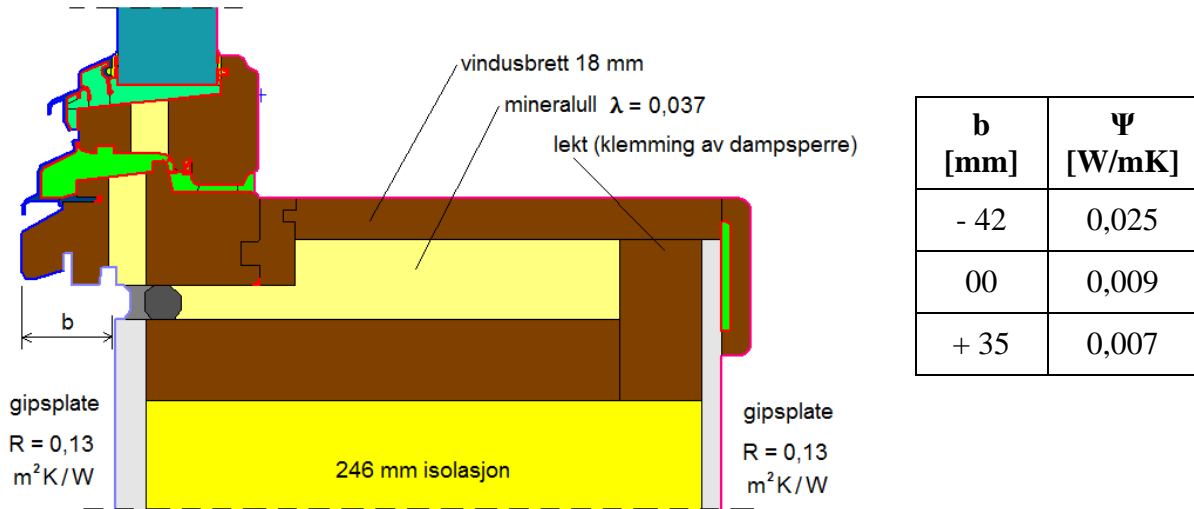
### Høyere vindusbrett

To variasjoner, relatert til innvendig fôring, ble gjort. Figur 31 viser beregningsmodell og kuldebroverdier for et tykkere vindusbrett, hvor høyden på monteringsfugen var uendret. Høyden på fôringen ble endret fra 19 mm til 32 mm. U-verdi til vinduet ble regnet ekskluderende vindusbrett.



Figur 31 Skisse av beregningsmodell med høyere vindusbrett. Kuldebroverdier for fem vindusplasseringer.

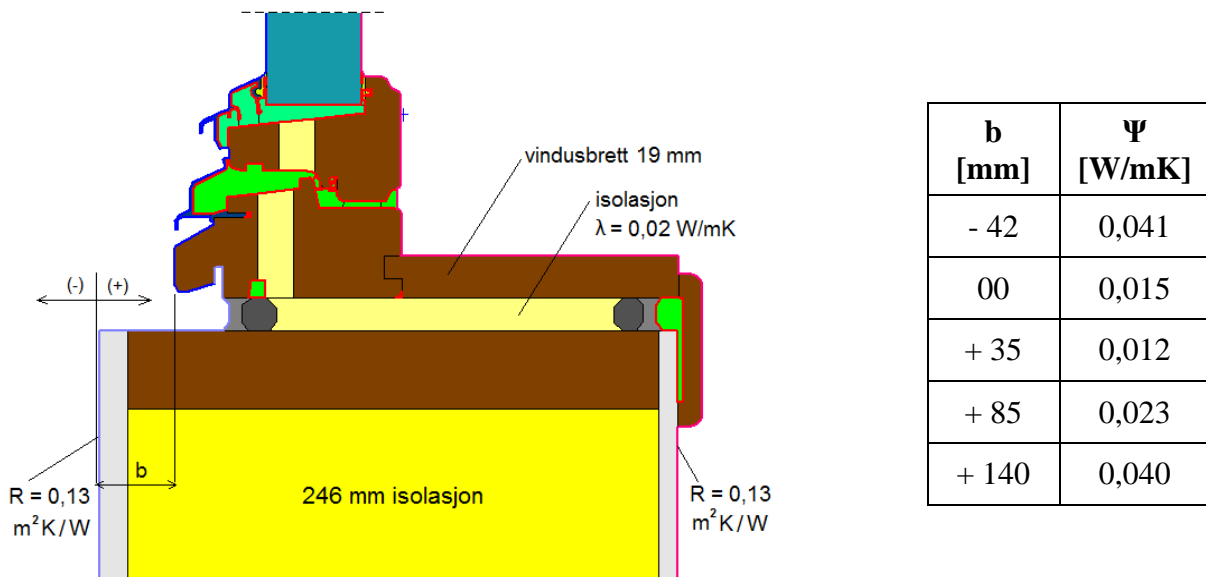
Det ble også gjort simulering av tilslutningsdetaljen med høyere vindusbrett og ekstra isolering av monteringsfugen. Enkelte detaljer ble endret og tilpasset for festing av vindusbrett og klemming av dampsperre, se figur 32. U-verdien til vinduet inkluderer ikke de ekstra detaljene og U-verdi til veggen ble regnet til overkant av losholt.



Figur 32 Skisse av beregningsmodell med høyere vindusbrett, ekstra isolert. Kuldebroverdier for tre vindusplasseringer.

### Isolasjonsmateriale i monteringsfugen

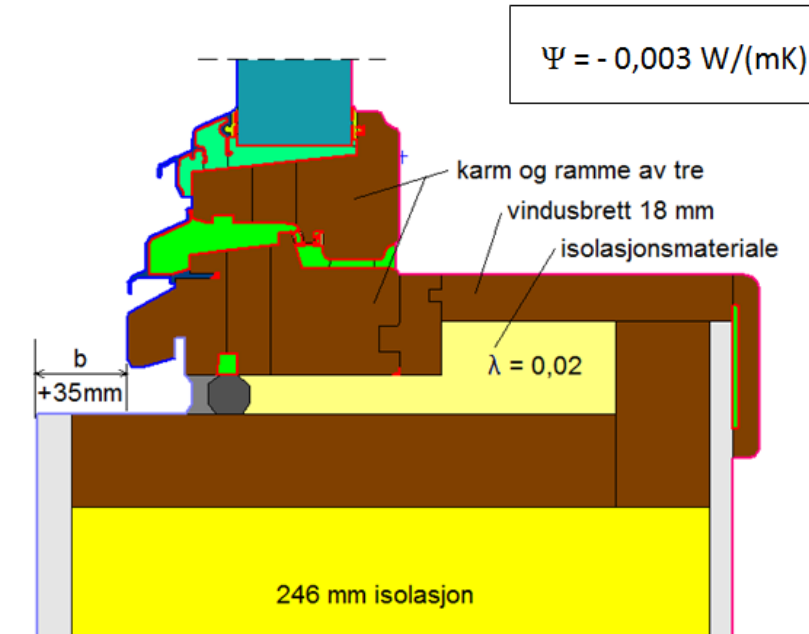
Mineralullisolasjonen i hullrommet mellom vindu og vegg var erstattet med materiale med varmekonduktivitet på 0,02 W/(mK). Resultatene er vist i figur 33.



Figur 33 Beregningsmodell og kuldebroverdier for endret isolasjonsmateriale i monteringsfugen. Beregnet for fem vindusplasseringer.

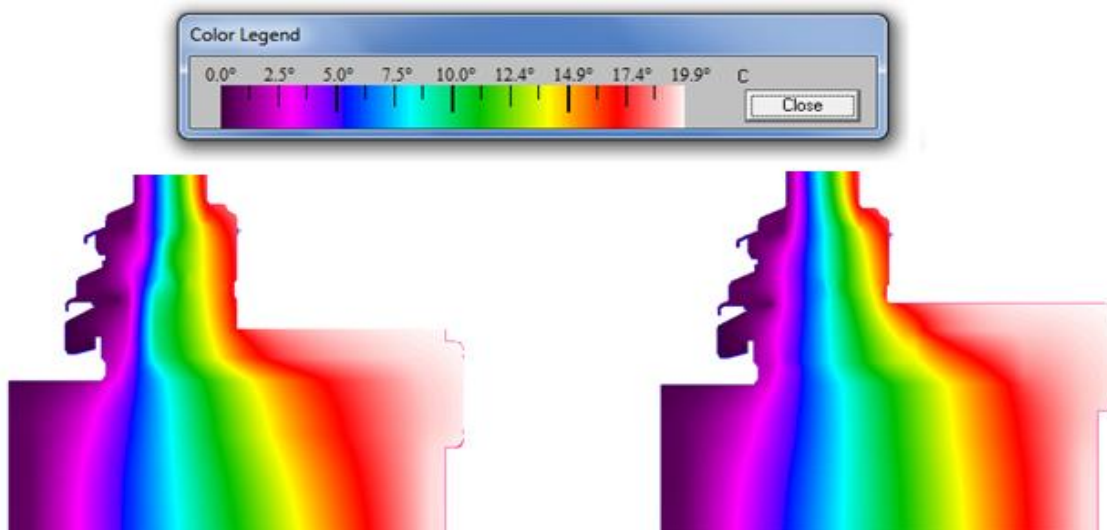
### Kombinasjon av parametre for lavere kuldebroverdi

Med utgangspunkt i de gjennomførte beregningene for bindingsverksvegg, ble det valgt å kombinere flere parametre for å finne en løsning for "en kuldebrofri tilslutningsdetalj". Simuleringen ble gjort for vindusplassering med avstand på +35 mm fra utvendig kant av vinduskarm til utside av vindsperre. Figur 34 viser beregningsmodell og beregnet kuldebroverdi.



Figur 34 Skisse av beregningsmodell for kombinasjon av parametre.

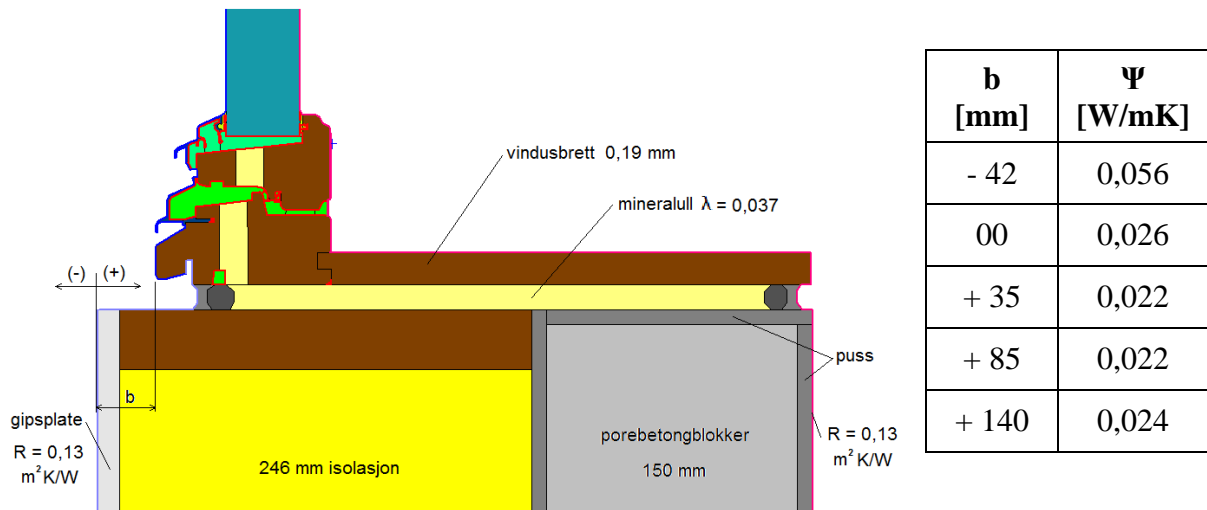
Kombinasjonen av parametre ble gjennomført for en bindingsverksvegg med 246 mm isolasjon, som vist i figur 27 (referanse konstruksjon). Den studerte løsningen kombinerte uisolert karm/ramme, høyere vindusbrett, med ekstra isolasjon i monteringsfugen og bedre termiske egenskaper til fugeisolasjonen. Fargeplott av temperaturfordeling for referanse konstruksjon og kombinasjonsløsning er vist i figur 35.



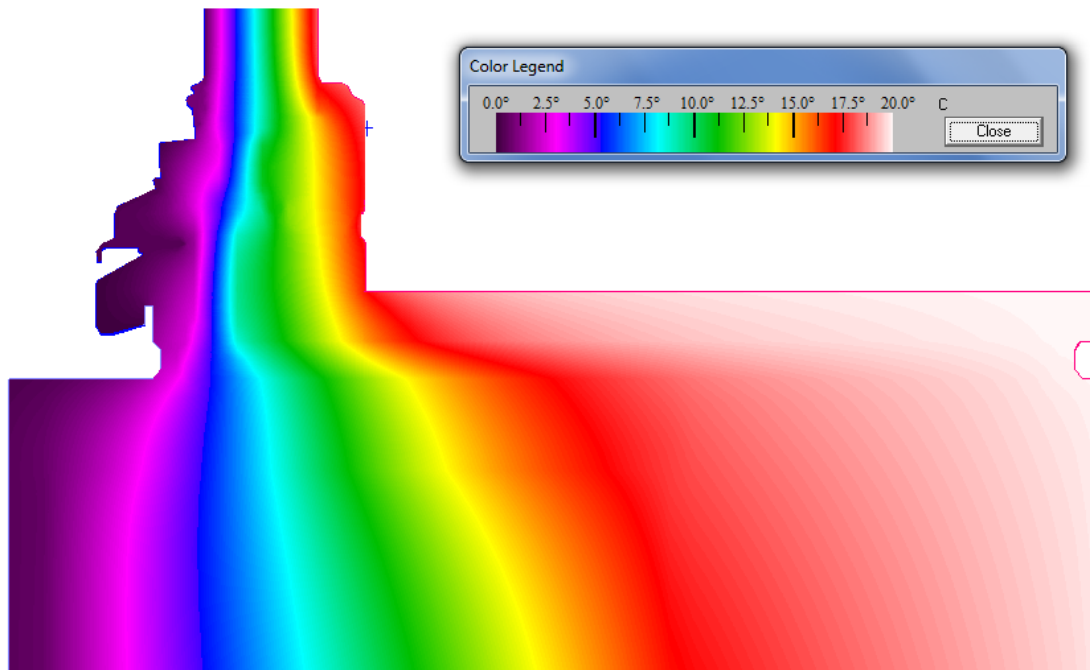
Figur 35 Temperaturfordeling for referanse konstruksjon (til venstre) og for kombinasjonsløsning (til høyre).

### 5.3.2.2 Yttervegg av porebetongblokker med utvendig isolert utlekting

Veggen var oppbygget av porebetongblokker med tykkelse 150 mm og utvendig utlekting, med isolasjonslag på 246 mm. Det ble regnet med utvendig luftet kledning. Puss på porebetong ble tatt med i modellene. Varmekonduktiviteten til isolasjonslaget var  $0,051 \text{ W/(mK)}$  og veggens U-verdi ble beregnet til  $0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Fem ulike vindusplasseringer ble simulert for denne type vegg. Plassering av vinduet ble basert på avstand fra utside av vindspærre (gipsplate) til utvendig kant av vinduskarm,  $b$  [mm]. Beregningsmodellen og resultatene er vist i figur 36. Fargeplott av temperaturfordeling er vist i figur 37.



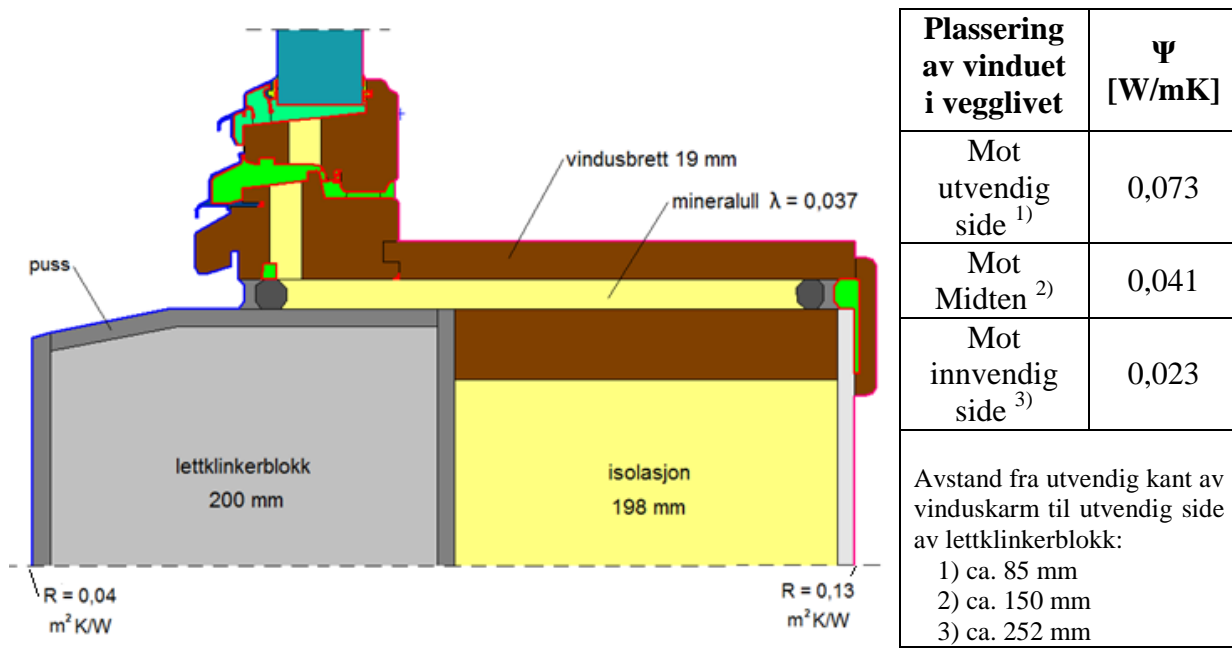
Figur 36 Innsetting av vindu i vegg av porebetongblokker med utvendig isolert utlekting. Kuldebroverdier for fem vindusplasseringer.



Figur 37 Temperaturfordeling i tilslutningsdetaljen. Vegg av porebetongblokker med utvendig isolert utlekting.

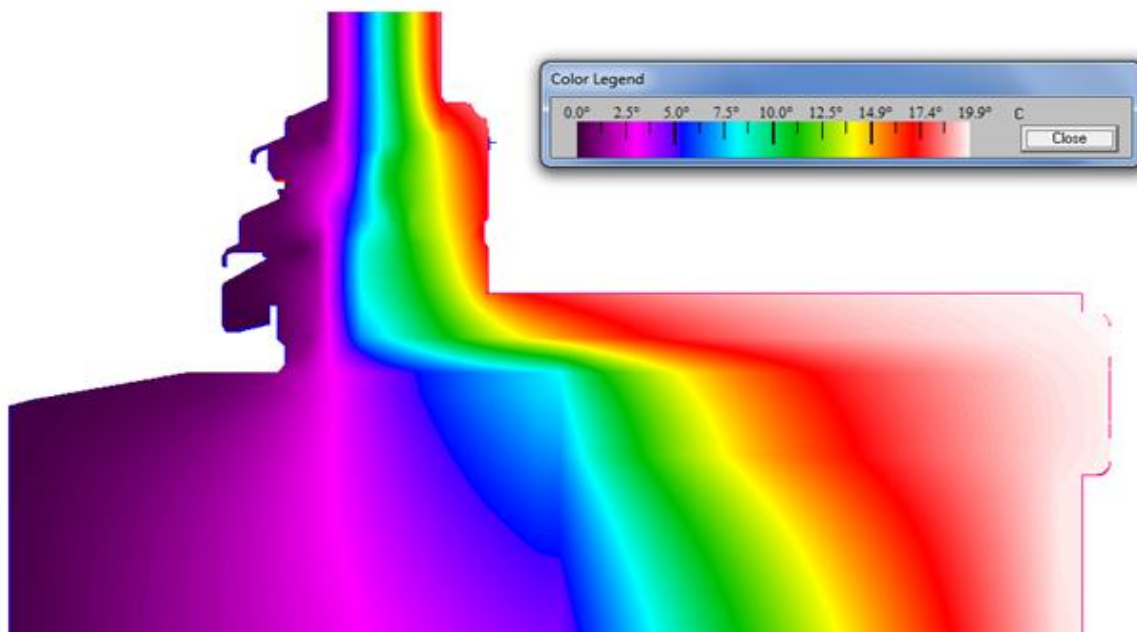
### 5.3.2.3 Vegg av lettklinkerblokker med innvendig isolering

Innsetting av vindu i yttervegg av lettklinkerblokker ble simulert for tre ulike plasseringer i vegglivet, se figur 38. Veggene var oppbygget av lettklinkerblokker med tykkelse 200 mm, pusset på alle sider, og 198 mm innvendig isolering. Veggens U-verdi ble beregnet til 0,17 W/(m<sup>2</sup>K) og ble benyttet i de tre simuleringene.



Figur 38 Skisse av beregningsmodell og kuldebroverdier for vegg av lettklinkerblokker. Tre ulike vindusplasseringer.

Figur 39 viser temperaturfordeling for en tilslutningsdetalj, hvor vinduet var plassert mot utvendig side av vegg. Avstand fra utvendig kant av karm til utside av vegg var ca. 85 mm.

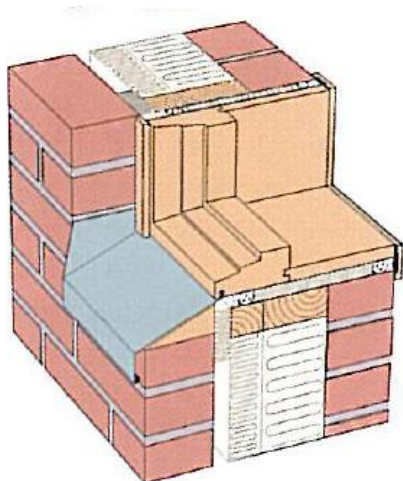


Figur 39 Fargeplott av temperaturfordeling for vegg av lettklinkerblokker med innvendig isolering.

Alle materialer ble tegnet kontinuerlig i beregningsmodellene. Fuger og oppdeling av isolasjonssjikt og treverk ble ikke tatt med. Puss på blokkvangen i smyget ble tegnet gjennomgående. Det ble ikke tatt hensyn til at U-verdien til veggen varierte litt, som følge av ulikt skråsnitt til den øverste blokken.

### 5.3.2.4 Skallmurvegg av tegl

Det ble gjort beregninger for tre ulike vindusplasseringer i en skallmurvegg av tegl, se figur 40. Plassering av vinduene basertes på avstand fra utvendig kant av vinduskarm til utvendig side av skallmurvegg.



Plassering av vinduet i vegglivet	$\Psi$ [W/mK]
Mot utvendig side <sup>1)</sup>	0,021
Mot midten <sup>2)</sup>	0,037
Mot innvendig side <sup>3)</sup>	0,086

Avstand fra utvendig kant av vinduskarm til utvendig side av ytre vange:

- 1) ca. 118 mm
- 2) ca. 200 mm
- 3) ca. 295 mm

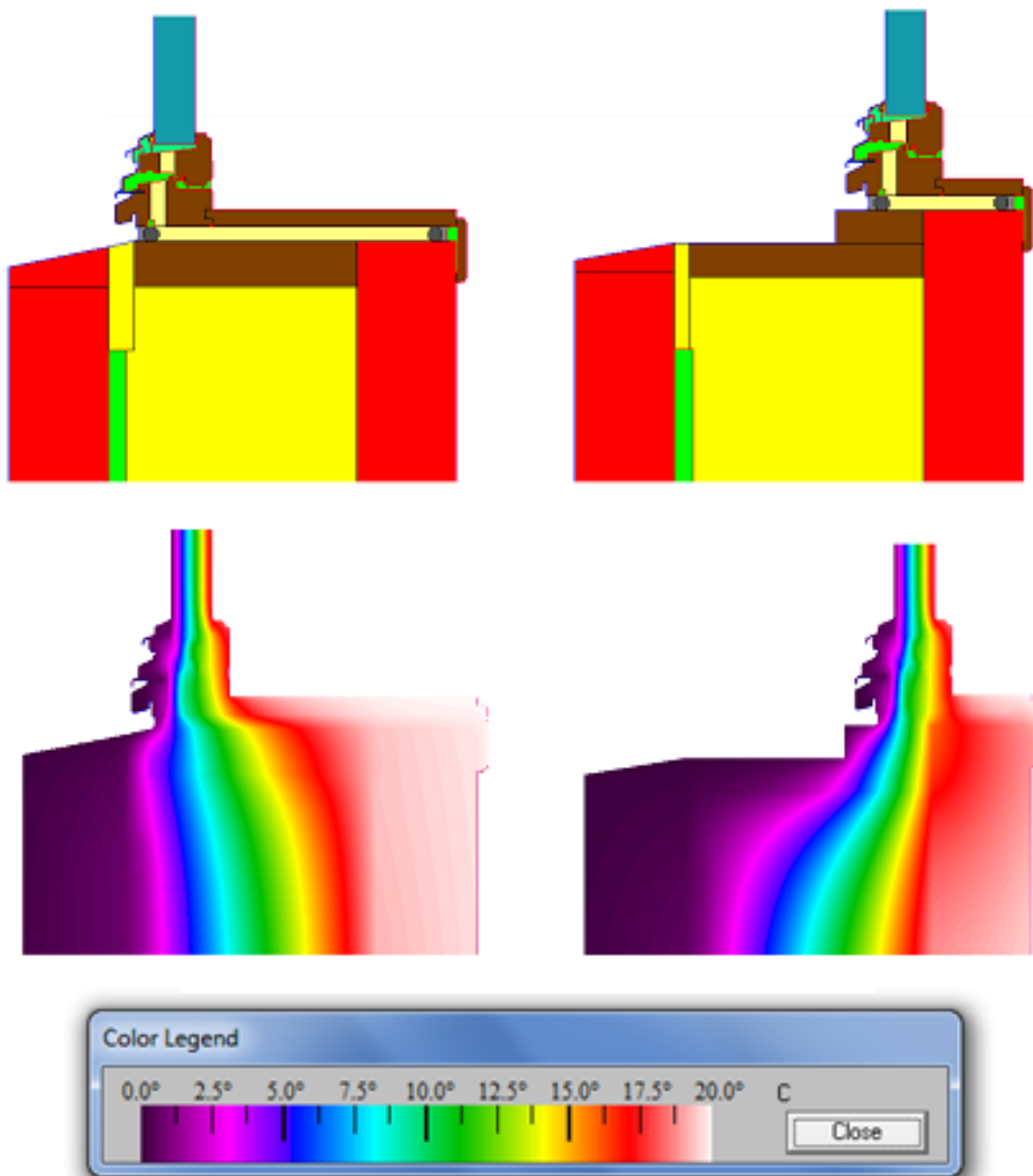
**Figur 40** Innsetting av vindu i skallmurvegg av tegl (Murkatalogen, 2006). Kuldebroverdier for tre vindusplasseringer.

Skallmurveggen var oppbygget av to vanger á 108 mm mangehullstein og 250 mm isolasjon mellom vangene. Veggens totale tykkelse var 486 mm. Beregningsmodellene inkluderer 20 mm uventilert hulrom bak ytre vange. Ved simulering av skallmurveggen ble det benyttet varmekonduktivitet til isolasjonslaget på 0,047 W/(mK). U-verdien for veggen var 0,17 W/(m<sup>2</sup>K), ekskluderende ekstra treverk rundt vinduet. Tilsvarende U-verdi for veggen, når alle detaljer var inkludert, varierte for de tre vindusplasseringene, på grunn av ulik oppbygging av tilslutningen.

Beregning av U-verdi til veggen og tilpasning av konduktiviteten til isolasjonslaget ble basert på U-verdi angitt i Byggdetaljer 471.012. Det er usikkert om trådbindere og fugearmering er inkluderte i den angitte verdien.

Både isolasjonslag, treverk og teglvanger ble tegnet kontinuerlig, det vil si at det ikke ble tatt hensyn til oppdeling av materialene. Fuger ble ikke tegnet i modellene, siden referanse U-verdi til veggen inkluderer kuldebrovirkningen i fugene.

Figur 41 viser THERM-modeller og temperaturfordeling for to vindusplasseringer - mot utvendig side (venstre) og mot innvendig side (høyre).

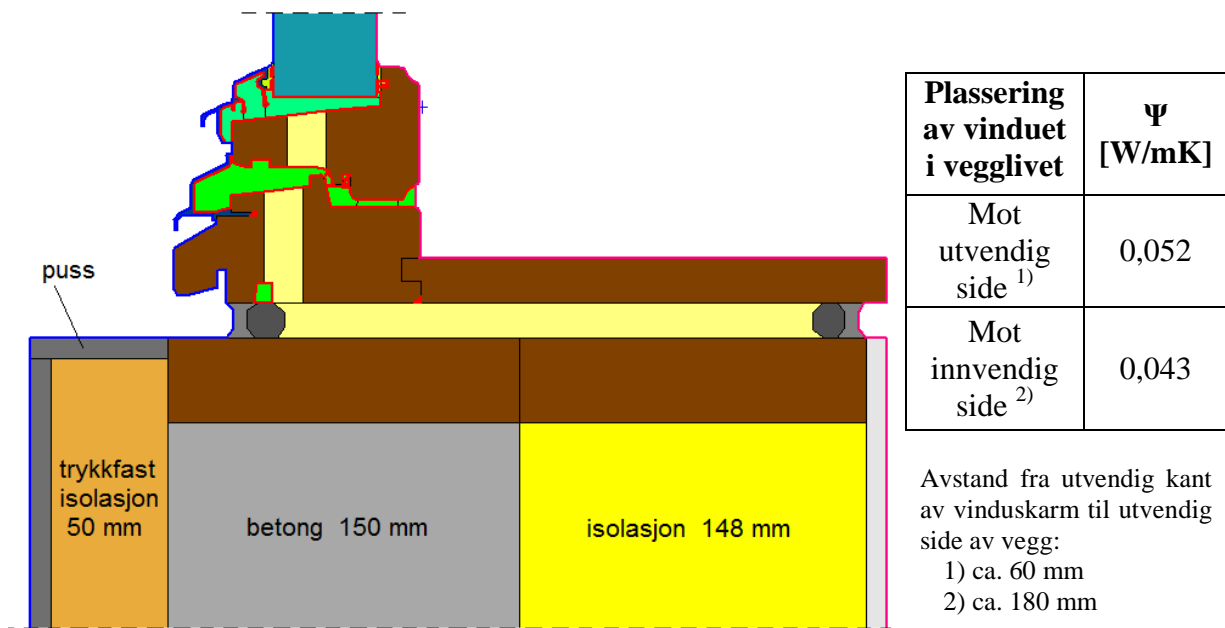


Figur 41 THERM-modeller og temperaturfordeling for to vindusplasseringer i skallmurvegg av tegl.

### 5.3.2.5 Vegg av betong med innvendig utlekting og utvendig isolasjon med puss

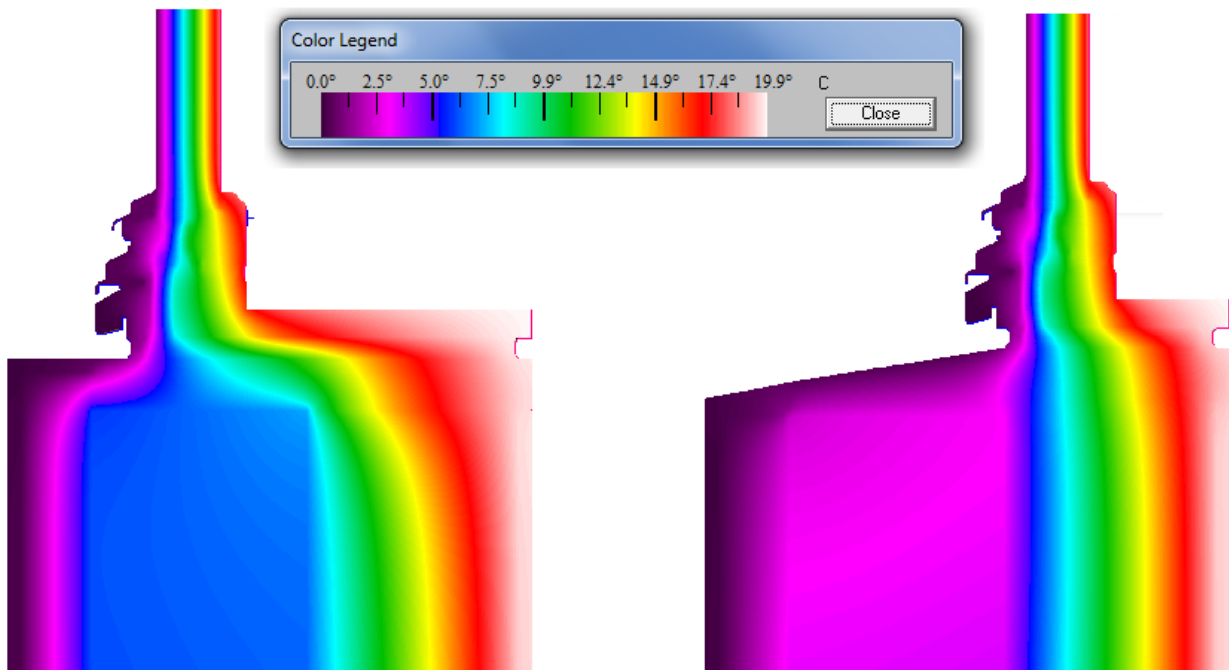
Det ble gjort beregninger av kuldebroverdi for to vindusplasseringer i en betongvegg. Veggene var oppbygget av 150 mm betong (armert med 2 % stål), 50 mm utvendig trykkfast isolasjon med puss og 148 mm innvendig utlekting. Varmekonduktiviteten til den utvendige isolasjonen var 0,037 W/(mK) og konduktiviteten til det innvendige isolasjonslaget ble satt til 0,041 W/(mK). U-verdi til veggene ble beregnet til 0,20 W/(m<sup>2</sup>K). Beregningsmodellen og resultatene er presentert i figur 42.

I simuleringene ble det valgt å plassere en trebjelke over betongen, i stedet for å la betongen gå helt opp til monteringsfugen. Utvendig isolasjon med puss ble ført opp til treverkets nivå.



Figur 42 Beregningsmodell og kuldebroverdier for betongvegg med innvendig utlekting og utvendig isolasjon med puss. To vindusplasseringer.

Figur 43 viser temperaturfordeling i konstruksjonen for de to vindusplasseringene. For innsetting av vinduet lenger inn i vegglivet, ble det tatt hensyn til nødvendig helning i oppkant av vegg.



Figur 43 Fargeplott av temperaturfordeling for to vindusplasseringer i betongveggen.



### 5.3.2.6 Oppsummering av resultatene

Tabell 8 gir en samlet oversikt over resultatene presentert over. Til sammen ble 51 beregninger i THERM gjennomført.

Vindusplasseringen er oppdelt i to hovedgrupper, avhengig av om veggen er med eller uten utvendig luftet kledning. Den første gruppen gjelder vegger med utvendig luftet kledning og baseres på avstand fra utvendig kant av vinduskarm til utvendig side av vindusperre. Den andre gruppen illustrerer relativ plassering av vinduet i vegglivet, basert på veggtykkelse, og avstand fra karm til utside av veggen varierer.

**Tabell 8 Kuldebroverdier for innsetting av vindu, basert på vindusplassering.**

Parameter/vegg		KULDEBROVERDI, $\Psi$ [W/(mK)]				
		Vindusplassering				
		- 42 mm	00 mm	+ 35 mm	+ 85 mm	+140 mm
<b>Bindingsverksvegg</b>	Isolasjon					
Isolasjonstykkelse i vegg	198 mm	0,040 *	0,014 *	0,012 *	0,031	
Isolasjonstykkelse i vegg <sup>1)</sup>	246 mm	0,047	0,019	0,015	0,025	0,041
Isolasjonstykkelse i vegg	296 mm	0,052 *	0,024	0,019	0,025	0,032 *
Uisolert karm/ramme <sup>2)</sup>	246 mm	0,037	0,013	0,010	0,020	0,037
Uisolert karm/ramme	296 mm	0,042	0,018	0,014	0,020	0,027
Tykkere fôring	246 mm	0,032	0,014	0,011 *	0,022	0,039 *
Høyere fôring + isolering <sup>3)</sup>	246 mm	0,025	0,009	0,007		
Bedre fugeisolering <sup>4)</sup>	246 mm	0,041	0,015	0,012	0,023	0,040
Kombinasjon <sup>1), 2), 3), 4)</sup>	246 mm			- 0,003*		
<b>Vegg av porebetongblokker</b>		0,056 *	0,026	0,022	0,022 *	0,024
		Mot utvendig side		Mot midten		Mot innvendig side
<b>Vegg av lettklinkerblokker</b>		0,073 *		0,041 *		0,023 *
<b>Skallmurvegg av tegl</b>		0,021		0,037		0,086
<b>Betongvegg med utvendig og innvendig isolering</b>		0,052				0,043

\* Isotermer og/eller fargeplott av temperaturfordeling presentert i Vedlegg 3.

Innsetting av vindu i ulike veggkonstruksjoner gir svært ulike kuldebroverdier. Både veggens oppbygging og detaljer rundt vindusmonteringen er med på å bestemme hvor stor varmestrøm

går gjennom fugen. Vegg av bindingsverk av tre kommer generelt best ut av beregningene. Det må likevel merkes at en rekke faktorer, knyttet til selve tilslutningen, påvirker størrelsen på kuldebroen for hver av de studerte veggkonstruksjonene.

Vindusplassering i vegglivet er avgjørende for kuldebroverdien, uansett veggkonstruksjon. Ulike plasseringsmuligheter gir ulike varmestrømsveier i kuldebroen. Den mest optimale vindusplasseringen, med tanke på reduksjon av varmetapet, varierer for de forskjellige veggene. For bindingsverksvegg betyr dette en avstand på 35 mm fra utside av vindspærre til utvendig kant av vinduskarm (for de tre studerte isolasjonstykkelser i veggen). Vinduer som monteres lenger inn eller lenger ut i treveggen gir større kuldebroverdier, uansett variasjon av andre faktorer. Vindusplassering i vegg av porebetongblokker viser seg å ha mindre betydning for kuldebroverdien, bortsett fra plassering ytterst i vegglivet. De beste løsningene for vegg av lettklinkerblokker og betongvegg er innsetting av vindu mot innvendig side av vegg.

Kuldebroverdiene som skiller seg, i vindusplasserings sammenheng, er for skallmurvegg av tegl. For denne veggen er plassering ytterst i vegglivet den beste løsningen. Dette kan imidlertid være et definisjonsspørsmål med hensyn til hva som regnes som et uttrukket vindu. I denne rapporten er valg av vindusplassering i skallmurvegg, relatert til veggens totale tykkelse på 486 mm. Det er videre tatt hensyn til at vinduer bør ikke festes til ytre vange, på grunn av relative bevegelser mellom indre og ytre vange. Vindusplassering ytterst i teglveggen tilsvarer en avstand på 118 mm fra utvendig kant av karm til utside av ytre vange, når både veggtykkelse og innmonterings prinsipp er tatt i betraktning.

Kuldebroens størrelse øker med økende isolasjonstykkelse i konstruksjonen. Tykkelsen på isolasjonslaget i veggen er avgjørende for både veggens totale tykkelse og for veggens U-verdi. En større varmemotstand til veggen medfører en relativ større varmestrøm gjennom monteringsfugen. En tykkere vegg gjør at varmestrømsveien blir relativ kortere ved vindustilslutningen enn for resten av konstruksjonen. Denne effekten er størst for et vindu plassert ytterst. Økende total tykkelse på veggen påvirker i tillegg vindusplasseringens betydning for kuldebroverdien, siden vindusplasseringen baseres på avstand fra utside av vindspærren. Når veggtykkelsen øker blir vinduet stående i samme posisjon og fremstår som vindu plassert lenger ut i vegglivet.

Oppbygging av karm- og rammekonstruksjonen har også innvirkning på kuldebroverdien. Erstatning av PUR isolasjonen med tre i både karm og ramme påvirker vinduets varmemotstand, slik at U-verdi til vinduet blir større. Likevel er det en reduksjon i kuldebroverdi ved bruk av uisolerte karm og ramme. Denne reduksjonen er størst for vindusplassering ytterst i veggen. Betydningen av den studerte parameteren for kuldebroverdien minker med forflytting av vinduet innover mot varm side av veggen. Påvirkningsgraden er uavhengig av isolasjonstykkelsen i veggen. Det vil si at reduksjonen i kuldebroverdi for hver vindusplassering er i samme størrelsesorden for de to veggtykkelsene.

Høyere plassert fôring og tilleggs varmeisolering av fugen har stor effekt på kuldebroverdien. Det er i denne rapporten valgt en beregningsmåte for U-verdi til vinduet, som ekskluderer alle materialer på innsiden av vinduskarmen. Dette betyr at fôring og eventuell varmeisolering regnes med i kuldebroverdien. Tilleggsvarmetapet gjennom kuldebroen reduseres vesentlig

dersom man flytter fôringen til oppkant av vinduskarm og benytter mere isolasjon i hulrommet. Et tykkere vindusbrett, selv uten tilleggisolering, viser seg også å være gunstig med tanke på minimering av kuldebroverdien. Betydningen av de to variasjonsparametrene er størst for et vindu plassert ytterst i vegglivet.

Kuldebroverdien for vindusinnsetting reduseres når hulrommet mellom vindu og vegg isoleres med materiale med lavere varmekonduktivitet. Den opprinnelige mineralullisolasjonen ( $\lambda = 0,037 \text{ W/mK}$ ) er erstattet med isolasjonsmateriale med  $\lambda = 0,02 \text{ W/mK}$ . Betydningen av de termiske egenskapene til fugeisolasjonen er størst for et vindu plassert ytterst i vegglivet. Grunnen til det er at monteringsfugen er lengst for denne vindusplasseringen og varmekonduktiviteten til isolasjonsmaterialet vil ha større betydning for varmegjennomgangen.

Ved kombinerings av flere parametre, kan man redusere kuldebroverdien for vindusinnsetting så mye at den kan bli negativ ( $- 0,003 \text{ W/(mK)}$ ). Kuldebroverdien for denne kombinasjonsløsningen vil i praksis være høyere, siden en høyere plassering av vindusbrett med tilhørende tilleggisolasjon, vil påvirke vinduets U-verdi. Når U-verdi til vinduet beregnes ut i fra projisert vindusareal (utvendige mål), vil kuldebroverdien være  $0,01 \text{ W/(mK)}$ .

## 5.4 Feilkilder

En rekke forenklinger i både THERM, beregningsmodell og materialdata er med på å bestemme nøyaktigheten av resultatene.

Dataprogrammet THERM beregner U-verdi og angir samtidig en feilestimerings energinorm (% Error Energy Norm). I følge THERM håndboken er en feilestimering på mindre enn 10 %, ekvivalent med en usikkerhet på under 1 % for U-verdien (THERM 6.3 Simulation Manual, LBNL 2011). Ved simuleringene i denne masteroppgaven er det benyttet en feilestimerings energinorm på 6 %.

Det ble benyttet en forenklet modell for grenseoverflatene i THERM. Det vil si at det ble tatt hensyn til kun temperatur og overgangsmotstand i beregningene. Strålingsdata ble ikke inkludert.

Ved simulering av veggkonstruksjonene ble det benyttet adiabatisk snittplan for hele dybden til vegg. Ved simulering av hele tilslutningsdetaljen ble det benyttet utvendig overgangsmotstand for snittplan utenfor monteringsfugen (i de tilfellene hvor vinduet ble plassert lenger inn i vegglivet).

Det ble gjort en rekke forenklinger i beregningsmodell, spesielt for veggkonstruksjoner. Flere av materialene ble tegnet kontinuerlig og flere av detaljene ble tegnet med forenklet geometri. Andre detaljer ble ikke tatt med i det hele tatt, slik som vannbrettbeslag og dampsperre.

Som beskrevet i rapporten, er vindusruten i NTECH vinduet erstattet med et isolasjonspanel. Dette påvirker vinduets U-verdi og vil derfor ha betydning for beregnede kuldebroverdier.

Materialdataene angitt i punkt 5.2.5 er benyttet som basis i alle simuleringer. Det er likevel mange faktorer ved en konstruksjon, som er avgjørende for materialenes varmekonduktivitet, som ikke ble tatt hensyn til. Når det gjelder konduktivitet til isolasjonssjiktet i veggene, ble treverk i sjiktet tatt i betraktning. Tilpasning av konduktiviteten ble basert på veggens U-verdi, som er angitt i Byggedetaljer 471.012. Det er usikkert hvorvidt benyttete konduktiviteter er presise og i hvilken grad dette har betydning for kuldebroverdien.

Kuldebroverdiene presentert i denne masteroppgaven er beregnet kun for bunnkarm. Gjennomsnittlig kuldebroverdi for et helt vindu kan derfor ikke bestemmes ut i fra de gjennomførte beregningene.

## 6 KONKLUSJON

En godt isolert bygning er en forutsetning for varmekomfort med et rimelig energibehov. Både enkelte bygningskomponenter og tilslutninger mellom dem bør fungere optimalt som en klimaskjerm. Tilslutning mellom vindu og vegg er ikke et unntak.

Samlede erfaringer fra masteroppgaven viser at vindusinnsetting i vegg er et komplekst og vidt tema. Det er mange faktorer og forhold relatert til innsetting av vinduer som må tas i betraktning ved valg av vindusløsning. Tilslutning mellom vindu og vegg har betydning for varmetekniske og fukttekniske forhold. I tillegg har vindusplassering i fasaden innvirkning på arkitektoniske forhold, vedlikeholdshyppighet og dagslystilgang i bygget.

Tilleggsvarmetapet gjennom vindus/vegg tilslutninger er svært viktig i energisammenheng. Likevel er oppfyllelse av myndighetskrav til normalisert kuldebroverdi ofte utilstrekkelig for å fastsette at den optimale vindusløsningen er funnet. Erfaringene fra det gjennomførte litteraturstudiet viser at kuldebroer ved vindusinnsetting kan påvirkes av flere faktorer. Vindusplassering, konstruksjons- og vindustype, materialvalg og oppbygging av monteringsfugen og kvalitet på innsettingsarbeidet er med på å bestemme kuldebroverdien. Flere av disse faktorene påvirker og forsterker hverandre.

Resultatene fra beregningene i både forstudie og hovedstudie viser at vindusplassering er avgjørende for kuldebroverdien. Plassering av vinduet ytterst i vegglivet er minst gunstig med tanke på minimering av varmetapet og påvirkes mest av andre faktorer, som igjen har innvirkning på kuldebroverdien. Vindusplasseringens betydning er nær relatert til isolasjonstykkelsen i vegg og varierer i tillegg for ulike veggkonstruksjoner. Varmestrømsberegningene viser også at kuldebroens størrelse øker med økende isolasjonstykkelse i konstruksjonen.

Ved hjelp av noen ikke så avanserte tiltak kan kuldebroverdien reduseres vesentlig. Innvendig tilleggsisolering av monteringsfugen, samt bruk av isolasjonsmateriale med lavere varmekonduktivitet i fugen, kan halvere opprinnelig kuldebroverdi for ulike vindusplasseringer.

Det finnes ikke et enkelt og allmenngyldig svar på hva som er riktig vindusløsning. En god prosjektering og utførelse er derfor nødvendig for verifisering av kuldebroverdi-krav og oppnåelse av et godt innemiljø, med et rimelig energibruk. Dette krever byggeteknisk og bygningsfysisk kompetanse, og samtidig en forståelse av sammenhengene mellom ulike ytelsesfaktorer knyttet til vinduer.



## 7 REFERANSER

- Arnesen, H. m.fl. (2009). *Moderne trevinduer - funksjonalitet, levetid og design*. SINTEF Byggforsk, Prosjektrapport 46.
- Decheva, L.M. (2011). *Passivhus og vindusarealer - vurdering av dagslysforhold koblet mot energiproblematikk*. Prosjektoppgave ved institutt for bygg, anlegg og transport. NTNU, Trondheim.
- Dokka, T. H. og Hermstad, K. (2006). *Energieffektive boliger for fremtiden - En håndbok for planlegging av passivhus og lavenergiboliger*. SINTEF Byggforsk, Trondheim.
- Edvardsen, K. og Ramstad, T. (2007). *Trehus*. Håndbok 53. Norges byggforskningsinstitutt 2006. Oslo.
- Feist, W. og Born, R. (2012). *Thermal bridge*. Institute for housing and environment, State of Hessen, Environment and Energy. (in German)  
[http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/espi/espi4.pdf](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/espi/espi4.pdf) (30.04.2012)
- Gustavsen, A. m.fl. (2008). *Kuldebroer - Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*. SINTEF Byggforsk, Prosjektrapport 25.
- Gustavsen, A., Jelle, B.P., Arasteh, D. og Kohler, C. (2007). *State-of-the-Art Highly Insulating Window Frames - Research and Market Review*. SINTEF Building and Infrastructure, Project report 6.
- Kristiansen, F.H. og Schultz, J.M. (2002). *Energimæssig helhedsvurdering af vinduer*, Rapport R-035. BYG•DTU, Danmarks Tekniske Universitet.
- Laustsen, J.B., Noye, P. og Svendsen, S. (2009). Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Kompendium 9, Oversigt over muligheder for udvikling af bedre ruder og vinduer. BYG•DTU, Danmarks Tekniske Universitet.
- Laustsen, J.B. og Svendsen, S. (2005). Improved Windows for Cold Climates.  
[http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art\\_151.pdf](http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_151.pdf) (30.04.2012)
- LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory, Windows and Daylighting Group, USA. THERM 6.3 / WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual, December 2011.  
<http://windows.lbl.gov/software/software.html> (13.03.2012)
- Murkatalogen (2006). Skallmurvegger og diafragmavegger. Anvisning P1. Mur-Sentret, Oslo.
- Murkatalogen (2003). Massive yttervegger. Anvisning P8. Mur-Senteret, Oslo.
- Novakovic, V. m.fl. (2007). *Enøk i bygninger. Effektiv energibruk*. NTNU - SINTEF, Trondheim.
- Schultz, J.M. og Svendsen, S. (2000). Improved energy performance of windows through an optimization of the combined effect of solar gain and heat loss. Paper for Eurosun 2000,

Denmark.

[http://ptp.irb.hr/upload/mape/kuca/16 Jorgen Munthe Schultz Improved Energy Performance Of Windows.pdf](http://ptp.irb.hr/upload/mape/kuca/16_Jorgen_Munthe_Schultz_Improved_Energy_Performance_Of_Windows.pdf) (20.04.12)

Schultz, J.M. (2002). *Vinduer med smal ramme/karmkonstruktion og stort lys- og solindfald*, Rapport R-028. BYG•DTU, Danmarks Tekniske Universitet.

Sikander, E. mfl. (2009). *Lågenergihus och passivhus - vanliga frågeställningar*. SP rapport 2009:28. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås.

Thue, J.V. (2009). *Husbyggingsteknikk*. Kompendium i TBA4160 Bygningsfysikk, grunnkurs. NTNU, Trondheim.

### **Lover, forskrifter og standarder:**

LOV 2008-06-27 nr 71: Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven, pbl). <http://www.lovdata.no> (23.03.2012)

FOR 2010-03-26 nr 489: Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK 10). <http://www.lovdata.no> (11.02.2012)

Veiledning om tekniske krav til byggverk. Statens bygningstekniske etat. <http://byggeregler.be.no> (11.02.2012)

NS 3031:2007+A1:2011 Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data. 5. utg. 2007.

NS-EN 12519 Vinduer og inngangsdører - Terminologi. 1. utg. 2004.

NS-EN ISO 6946:2007 Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgang - Beregningsmetode. 2.utg. 2007.

NS-EN ISO 10077-1 Termiske egenskaper til vinduer, dører og skodder - Beregning av varmegjennomgangskoeffisient - Del 1: Generelt. 2. utg. 2007.

NS-EN ISO 10077-2 Termiske egenskaper til vinduer, dører og skodder - Beregning av varmegjennomgangskoeffisient - Del 2: Numerisk metode for karm og ramme. 1. utg. 2003.

NS-EN ISO 10211:2007 Kuldebroer i bygningskonstruksjoner - Varmestrømmer og overflatetemperaturer - Detaljerte beregninger. 1. utg. 2007.

NS-EN ISO 10456:2007 +NA:2010 Byggematerialer og -produkter - Hygrotermiske egenskaper - Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarete og praktiske termiske verdier. 3 utg. 2007.



- NS-EN ISO 12567-1:2010 Dørers og vinduers termiske egenskaper - Bestemmelse av varmegjennomgangskoeffisient ved varmekammermetoden - Del 1: Komplette dører og vinduer. 2. utg. 2010.
- NS-EN ISO 14683:2007 Kuldebroer i bygningskonstruksjoner - Lineær varmegjennomgangskoeffisient - Forenklete beregningsmetoder og normalverdier. 2 utg. 2007.
- NS-ISO 15099:2003 Termiske egenskaper til vinduer, dører og skjerming - Detaljerte beregninger. 2003.

**NBI-blad, Byggforskserien:****Byggdetaljer**

- 421.501 Temperaturforhold og lufthastighet. Betingelser for termisk komfort. (1-1999)
- 471.008 Beregning av U-verdi etter NS-EN ISO 6946. (1-1998)
- 471.010 Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer. (1-2003)
- 471.012 U-verdier. Vegger over terreng. Del 1 og 2. (1-2003)
- 471.015 Kuldebroer. Konsekvenser og dokumentasjon av energibehov. (2008)
- 471.016 Kuldebroer. Metoder for å bestemme kuldebroverdi. (1-1999)
- 471.017 Kuldebroer. Tabeller med kuldebroverdier. (2008)
- 471.018 Energikrav til bygninger. Dokumentasjonsmåter. Energiltak. (2008)
- 471.023 Energikrav til bygninger. Omfordeling av varmetap. (2008)
- 471.024 Energikrav til bygninger. Samlet netto energibehov. (2-2007)
- 523.701 Innsetting av vindu i vegger av bindingsverk. (1-2003)
- 523.702 Innsetting av vindu i mur- og betongvegger. Del 1 og 2. (1-2003)
- 533.102 Vinduer. Typer og funksjoner. (1-2000)
- 573.105 Tettelister. Egenskaper og materialvalg. (2-2004)

**Byggforvaltning**

- 720.015 Utbedring av kuldebroer. (2-1999)
- 723.638 Utskifting av vinduer. (1-2003)
- 733.162 Utbedring av eldre trevinduer. (1-2004)
- 740.111 Kondens på kalde overflater. Årsaker og tiltak. (2-2007)

## 8 VEDLEGG

Vedlegg 1 - Oppgavetekst .....	8 - 1
Vedlegg 2 - Eksempel på beregning av kuldebroverdi i Excel regneark.....	8 - 5
Vedlegg 3 - Isotermer og fargeplott av temperaturfordeling for utvalgte tilslutningsdetaljer .....	8 - 6
Bindingsverksvegg med 198 mm isolasjon .....	8 - 6
Bindingsverksvegg med 296 mm isolasjon .....	8 - 7
Bindingsverksvegg med 246 mm isolasjon, tykkere fôring .....	8 - 8
Bindingsverksvegg med 246 mm isolasjon, kombinasjons løsning .....	8 - 9
Vegg av porebetongblokker med utvendig utlekting .....	8 - 10
Vegg av lettklinkerblokker med innvendig isolering .....	8 - 11



Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi  
Institutt for bygg, anlegg og transport

Oppgavetekst - 4 sider

## MASTEROPPGAVE

(TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgave)

VÅREN 2012

for

**Larisa Marinova Decheva**

Vinduer for energieffektive bygninger - Kuldebroer ved vindusinnsetting

### BAKGRUNN

Vinduer har mange oppgaver. De sikrer dagslystilførsel og solvarmetilskudd, formidler visuell kontakt, gir ventilasjons muligheter og kan fungere som rømningsveg. Men vinduenes termiske egenskaper fører til et større varmetap, da de har vesentlig større transmisjonsvarmetap enn godt isolerte vegg- og takpartier. Selv om man allerede har mye erfaring og kunnskap om vinduer, er det fremdeles mye som er uavklart og omdiskutert. Forholdsvis høy U-verdi og kuldebroer langs vinduskarm og ramme gjør at vinduer kan ha stor innvirkning på energibalansen til en bygning. Vinduer er derfor ofte omtalt som "de termisk svake punktene" i en bygningskropp. Vindusoppbygging og plassering kan velges og løses på flere måter, og hvilke måter eller løsninger som er mest effektive mht økonomi, miljø, energibruk og bruksegenskaper er fremdeles en del av den løpende fagdiskusjonen.

### OPPGAVE

#### Beskrivelse av oppgaven

Hensikten med oppgaven er å undersøke en del aspekter knyttet til vindusinnsetting i vegg, samt å kartlegge faktorer som har betydning for tilleggsvarmetapet gjennom hulrommet mellom vegg og vindu. Oppgaven fokuserer på varmegjennomgang og kuldebroverdier for ulike vindus/vegg løsninger. Materialvalg, oppbygging og plassering av vindu i veggen er avgjørende for kuldebroverdien, som videre har innvirkning på bygningens energibalanse. Ved

## VEDLEGG 1

---

overlapp mellom vegg og karm også innsettingsmetoden har innvirkning på U-verdien til karm og ramme (men dette kan også være et definisjonsspørsmål med hensyn til hva som skal regnes med i kuldebroverdien og eller karm/ramme sin U-verdi).

Masteroppgaven vil se spesielt på disse faktorene og deres betydning på kuldebroverdien. Masterstudien vil også sikte på å finne den optimale løsningen for kuldebrofri vindusinnsetting i vegg (hvis mulig). Det vil være aktuelt å gjennomføre varmestrømsberegninger for tilslutning mellom vegg og vindu for et eller flere eksempelprosjekter. Dataprogrammene THERM og WINDOW vil være aktuelle hjelpemidler.

### **Deloppgaver og forskningsspørsmål**

Følgende delaktiviteter vil kunne inngå i masteroppgaven:

- A. Gjennomføre en litteraturundersøkelse, kartlegging og vurdering av:
  - a. Erfaringer og tidligere undersøkelser i forbindelse med kuldebroer ved vindusinnsetting (norsk og internasjonal litteratur).
  - b. Betydning og konsekvenser av varmetap og kuldebroer ved vinduskarm.
  - c. Ulike karm/ramme løsninger: materialvalg, isolering, oppbygging og plassering i veggene.
  - d. Eksisterende systemer som minimaliserer kuldebro effekten ved innsetting av vindu.
- B. Gjennomføre varmestrømsberegninger for forskjellige vindus/vegg konstruksjoner. Det er da aktuelt å benytte programmene THERM og WINDOW til å gjøre en vurdering av de ulike faktorene som har betydning for kuldebroproblematikken.

# VEDLEGG 1

---

## GENERELT

Opgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidningen og selvstendighet i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- forord
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- innholdsfortegnelse inklusive oversikt over figurer, tabeller og vedlegg
- om nødvendig en liste med beskrivelse av viktige betegnelser og forkortelser benyttet
- hovedteksten
- referanser til kildemateriale som ikke er av generell karakter, dette gjelder også for muntlig informasjon og opplysninger.
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.
- besvarelsen skal ha komplett paginering (sidenummerering).

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel. Arbeidet leveres da også med rapportforside og tittelside og om nødvendig med vedlegg som dokumenterer arbeid utført i prosessen med utforming av artikkelen.

Se forøvrig «Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave ved Institutt for bygg, anlegg og transport». Finnes på <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>

### Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Ved innlevering av oppgaven skal kandidaten levere en CD med besvarelsen i digital form i pdf- og word-versjon med underliggende materiale (for eksempel datainnsamling) i digital form (f. eks. excel). Videre skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om det var utført av

## VEDLEGG 1

---

en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

**(Evt) Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.**

Beskrives her når dette er aktuelt. Se <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

**Helse, miljø og sikkerhet (HMS):**

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befarings, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>.

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

**Innleveringsfrist:**

Arbeidet med oppgaven starter 16. januar 2012.

Besvarelsen leveres senest ved registrering i DAIM innen 11. juni 2012 kl 1500.

**Faglærer ved instituttet:** Bjørn Petter Jelle

**Veileder hos ekstern samarbeidspartner:** Arild Gustavsen, Institutt for byggekunst, historie og teknologi

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 11.06.2012

Bjørn Petter Jelle

Faglærer

## VEDLEGG 2

### EKSEMPEL PÅ BEREGNING AV KULDEBROVERDI I EXCEL REGNEARK

Beregning av kuldebroverdi for vindusinnsetting i et homogent veggpanel. Panelets U-verdi er konstant, mens tykkelse og konduktivitet varierer. Beregning for tre vindusplasseringer.

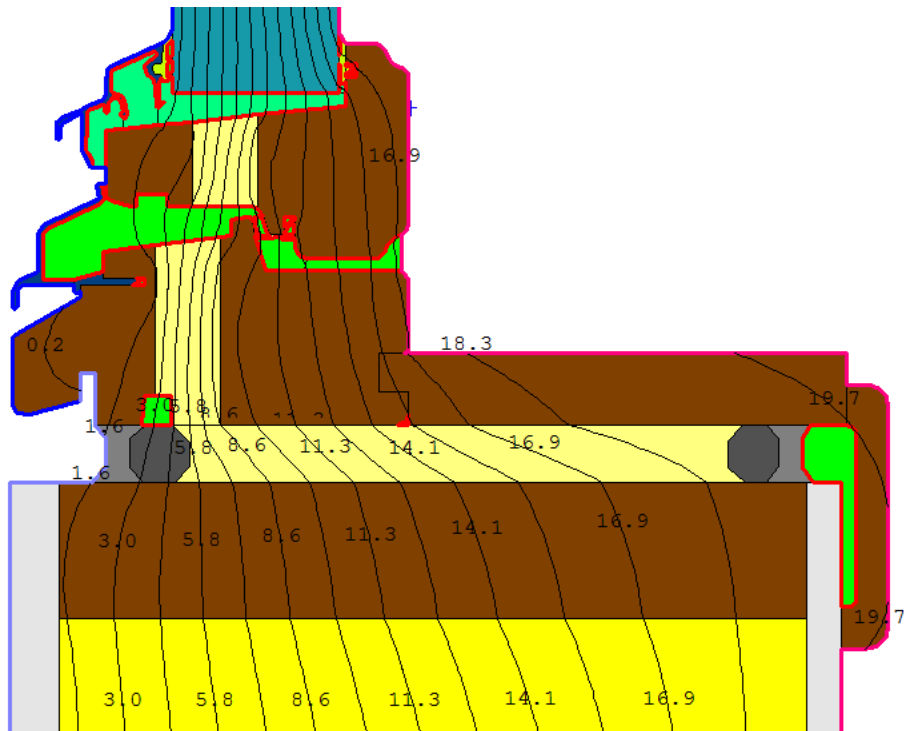
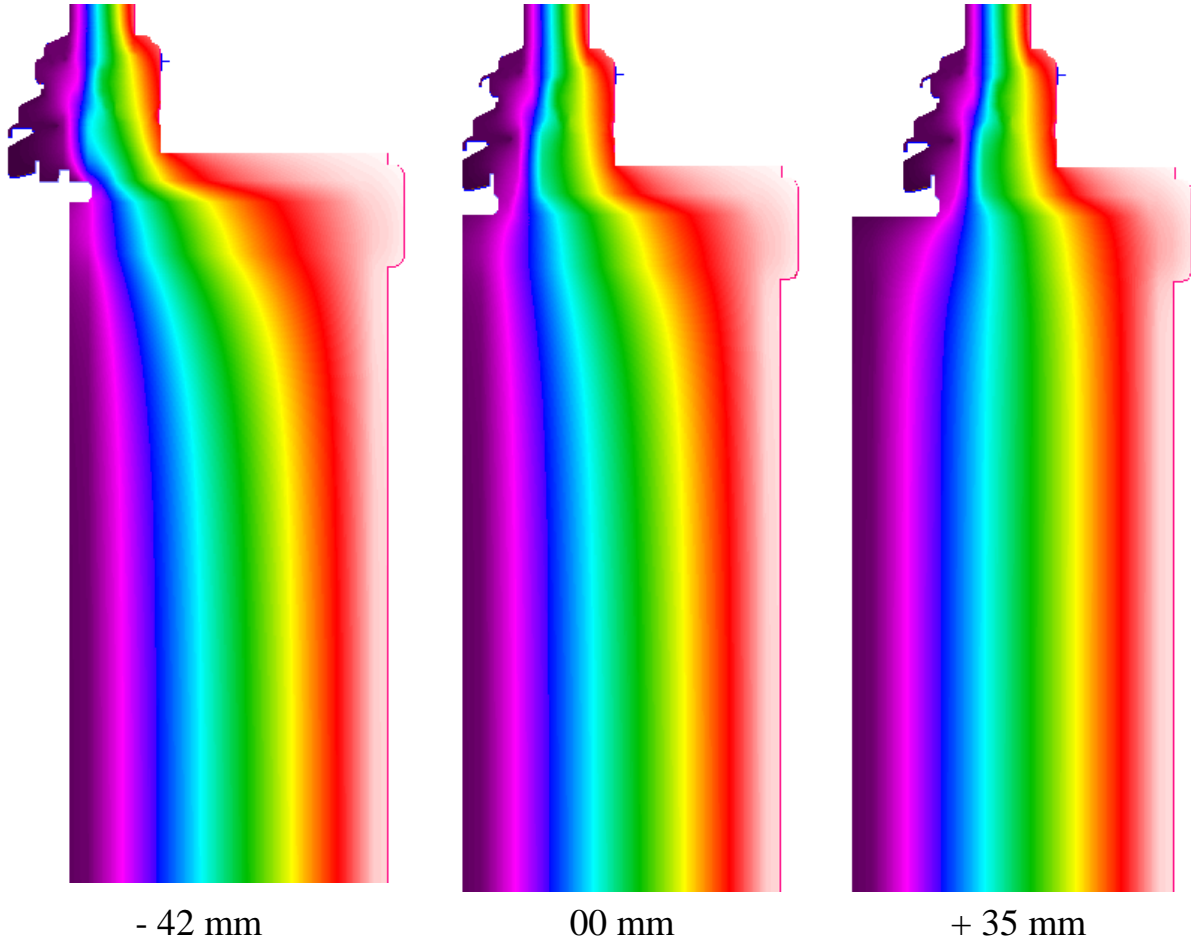
$$\Psi = L_1^{2D} - L_2^{2D} - L_3^{2D}$$

Vegg- U-verdi= 0.19 d [mm], λ [W/mK]	Med kuldebro		Vegg		Vindu		Ψ [W/mK]
	l <sub>1</sub> [m]	U <sub>1</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	l <sub>2</sub> [m]	U <sub>2</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	l <sub>3</sub> [m]	U <sub>3</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	
<b>-42 mm</b>	200, 0.04	0.332	1.200	0.190	0.294	0.822	0.031
	250, 0.05	0.336	1.200	0.190	0.294	0.822	0.037
	268, 0.0538	0.338	1.200	0.191	0.294	0.822	0.039
	300, 0.06	0.340	1.200	0.190	0.294	0.822	0.044
	350, 0.0703	0.346	1.200	0.191	0.294	0.822	0.051
	400, 0.08	0.350	1.200	0.190	0.228	0.294	0.059
450, 0.09	0.355	1.200	0.190	0.228	0.294	0.066	
Vegg- U-verdi= 0.19 d [mm], λ [W/mK]	Med kuldebro		Vegg		Vindu		Ψ [W/mK]
	l <sub>1</sub> [m]	U <sub>1</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	l <sub>2</sub> [m]	U <sub>2</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	l <sub>3</sub> [m]	U <sub>3</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	
<b>00 mm</b>	200, 0.04	0.317	1.200	0.478	0.294	0.822	0.008
	250, 0.05	0.320	1.200	0.483	0.294	0.822	0.013
	268, 0.0538	0.321	1.200	0.485	0.294	0.822	0.014
	300, 0.06	0.323	1.200	0.488	0.294	0.822	0.018
	350, 0.0703	0.328	1.200	0.495	0.294	0.822	0.025
	400, 0.08	0.332	1.200	0.501	0.228	0.294	0.032
450, 0.09	0.337	1.200	0.508	0.228	0.294	0.038	
Vegg- U-verdi= 0.19 d [mm], λ [W/mK]	Med kuldebro		Vegg		Vindu		Ψ [W/mK]
	l <sub>1</sub> [m]	U <sub>1</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	l <sub>2</sub> [m]	U <sub>2</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	l <sub>3</sub> [m]	U <sub>3</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	
<b>+35 mm</b>	200, 0.04	0.317	1.200	0.477	0.294	0.822	0.008
	250, 0.05	0.319	1.200	0.481	0.294	0.822	0.011
	268, 0.0538	0.320	1.200	0.483	0.294	0.822	0.012
	300, 0.06	0.321	1.200	0.484	0.294	0.822	0.015
	350, 0.0703	0.325	1.200	0.490	0.229	0.294	0.020
	400, 0.08	0.328	1.200	0.495	0.228	0.294	0.025
450, 0.09	0.332	1.200	0.501	0.228	0.294	0.031	

## VEDLEGG 3

### Bindingsverksvegg med 198 mm isolasjon

Fargeplott av temperaturfordeling for tre vindusplasseringer. Isothermer for vindusplassering 00 mm.

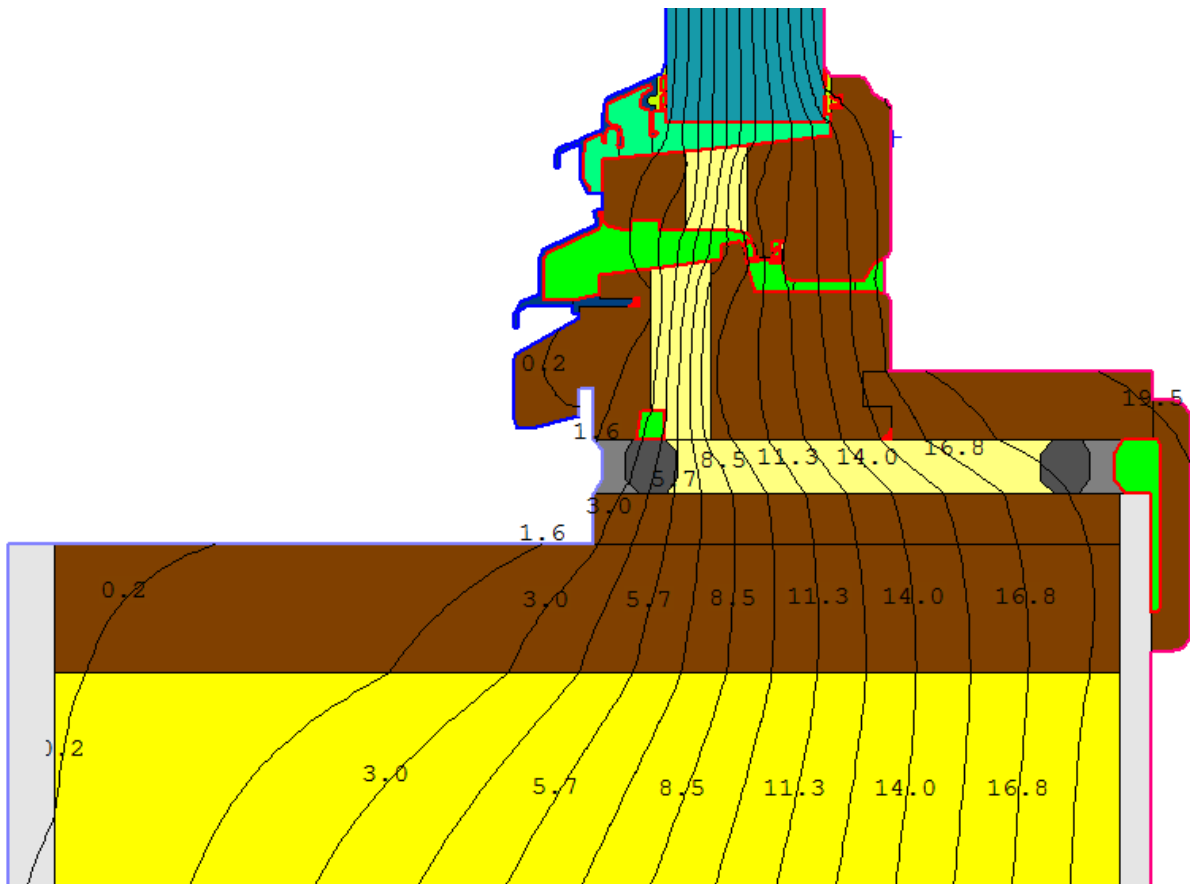
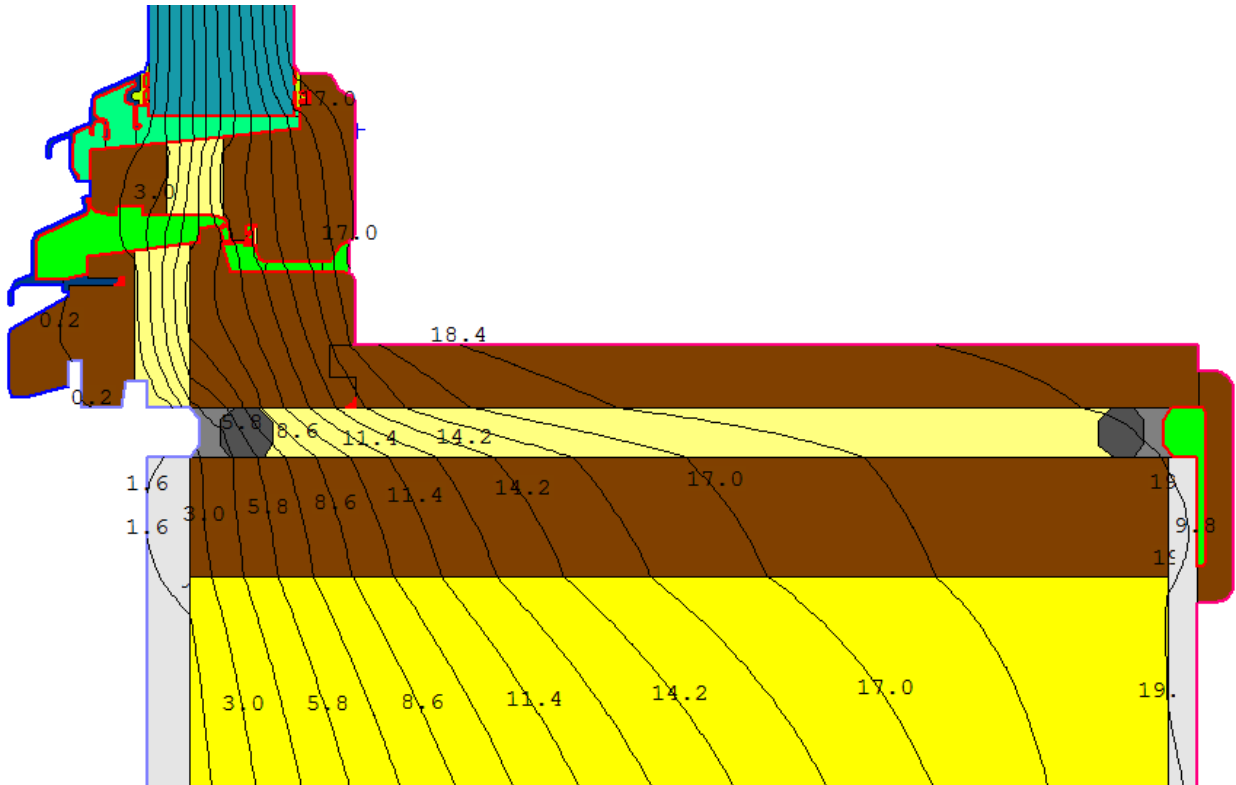




# VEDLEGG 3

## Bindingsverksvegg med 296 mm isolasjon

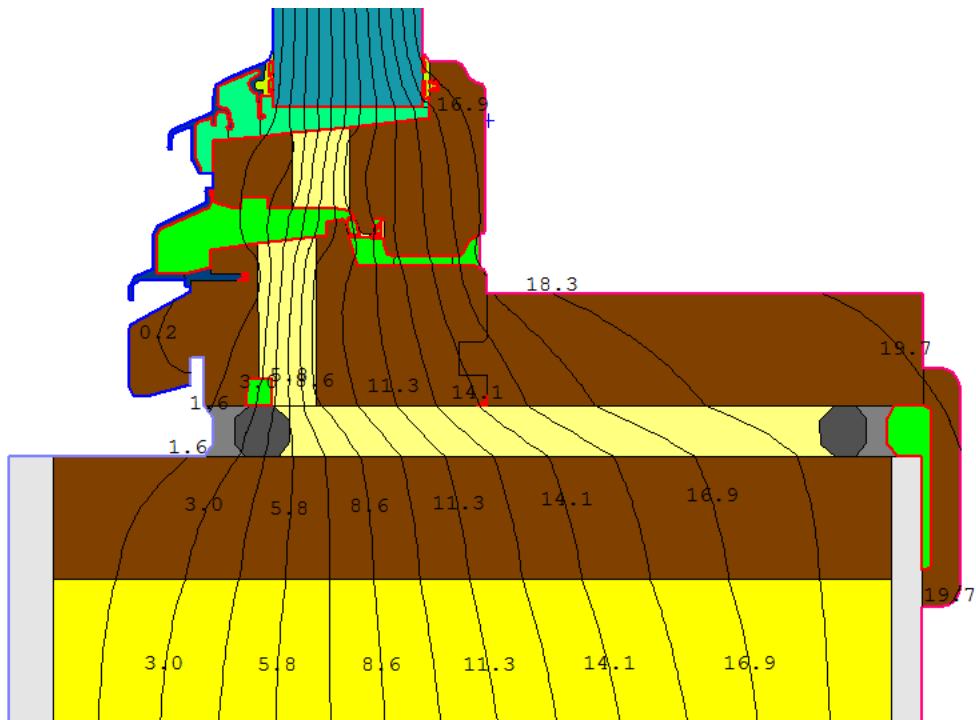
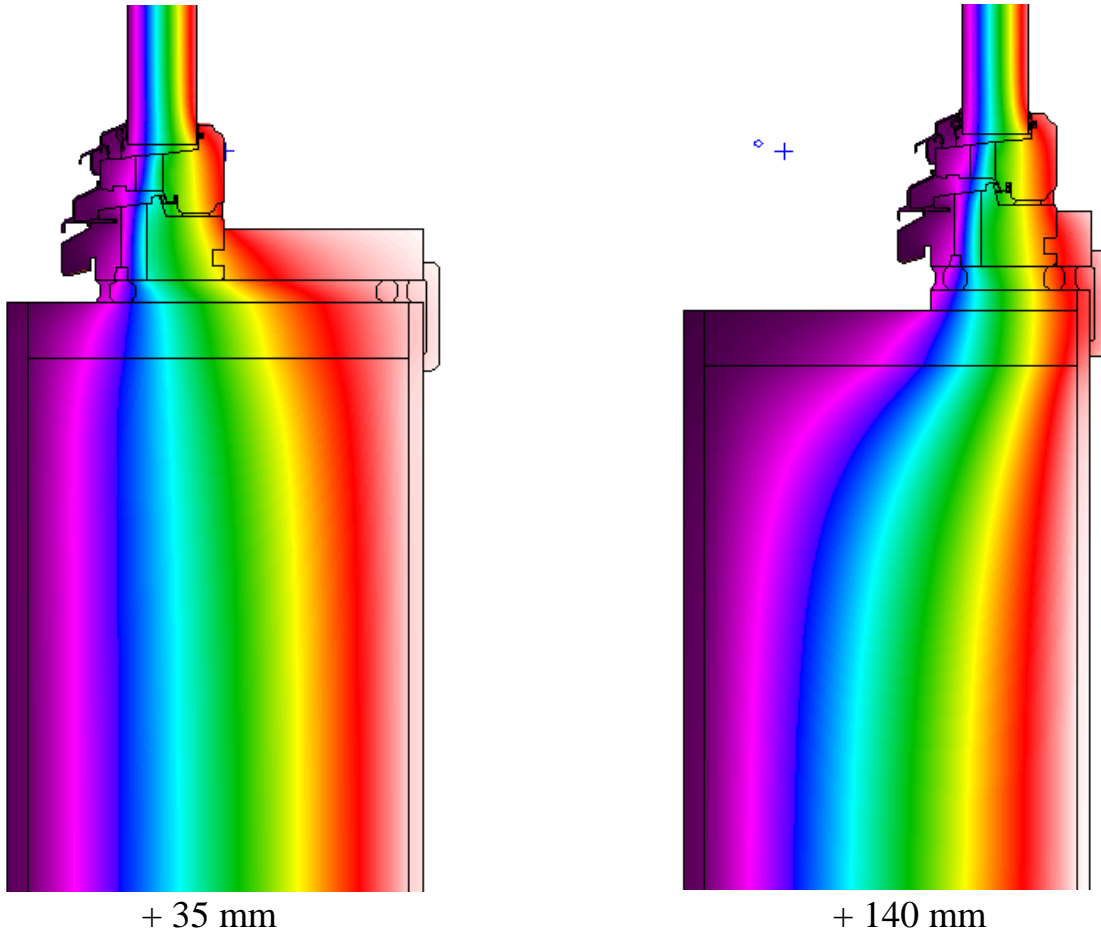
Isotermier for to vindusplasseringer: - 42 mm og + 140 mm



# VEDLEGG 3

## Bindingsverksvegg med 246 mm isolasjon, tykkere fôring

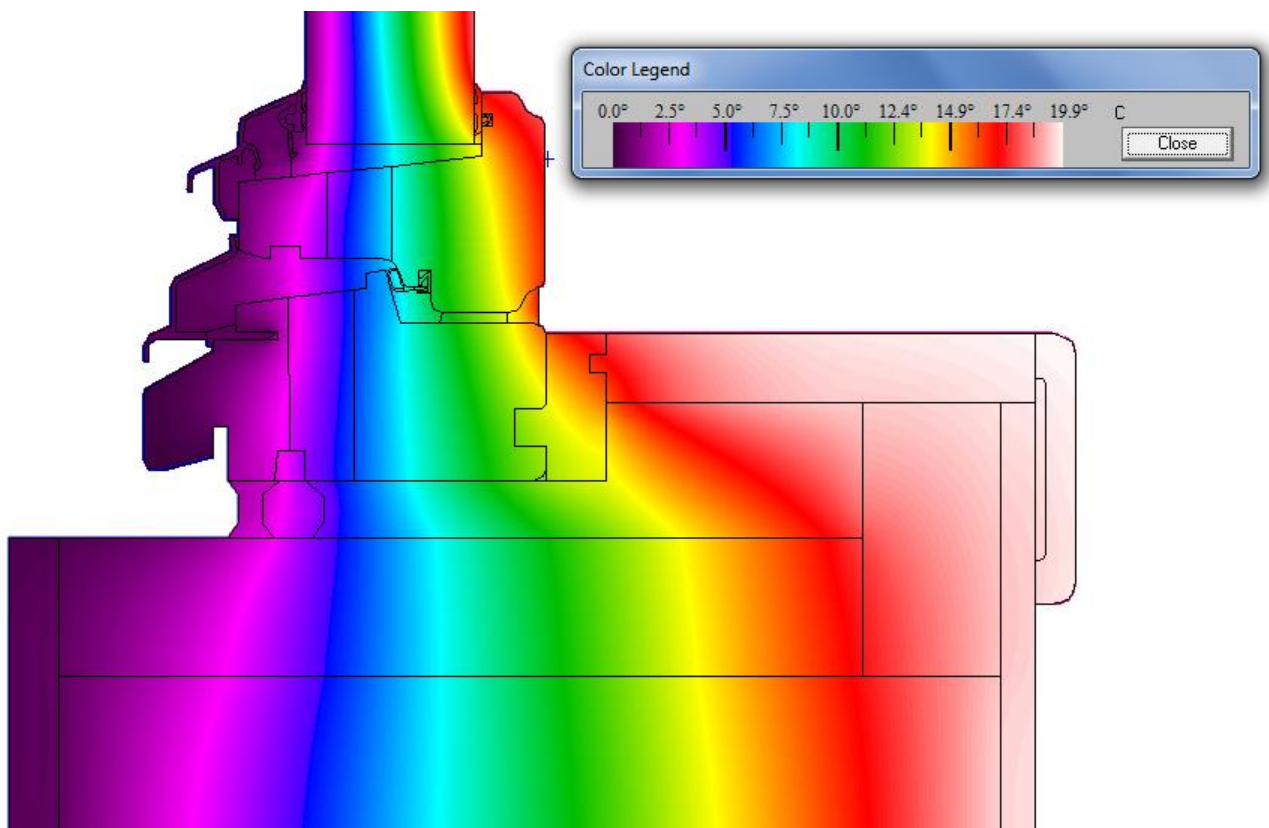
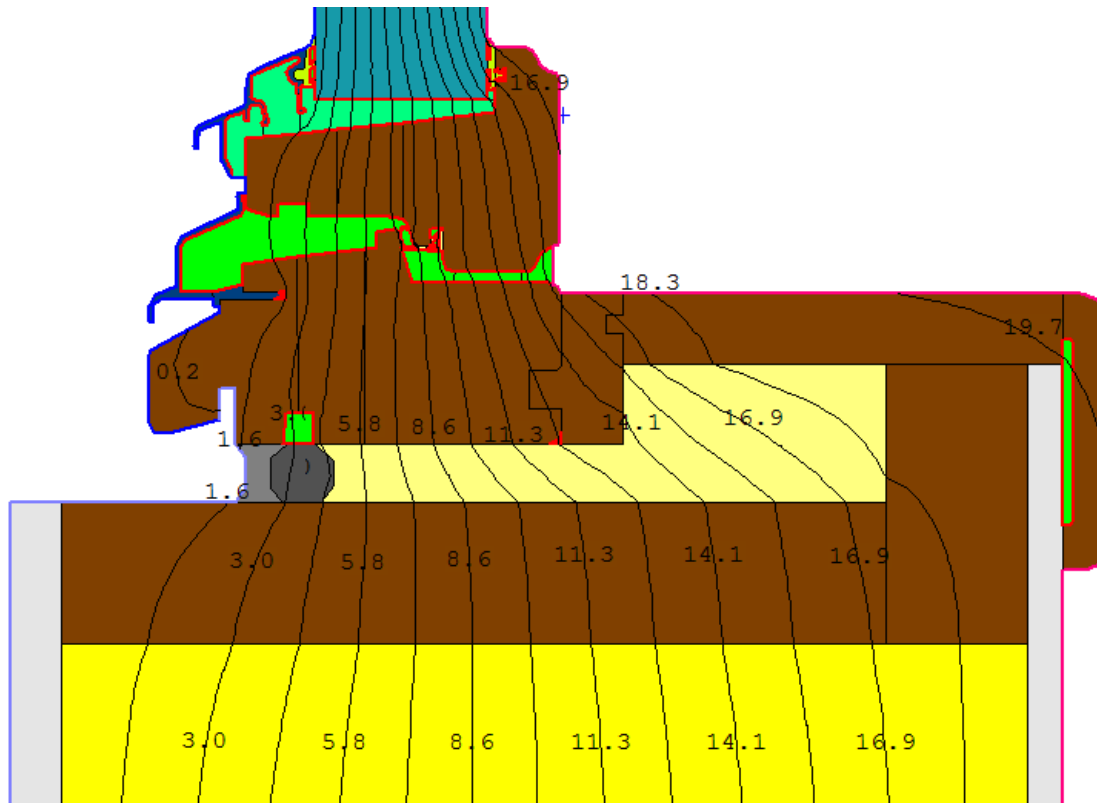
Fargeplott av temperaturfordeling for to vindusplasseringer. Isothermer for vindusplassering + 35 mm.



## VEDLEGG 3

### Bindingsverksvegg med 246 mm isolasjon, kombinasjonsløsning

Isotermier og fargeplott av temperaturfordeling. Vindusplassering: + 35 mm

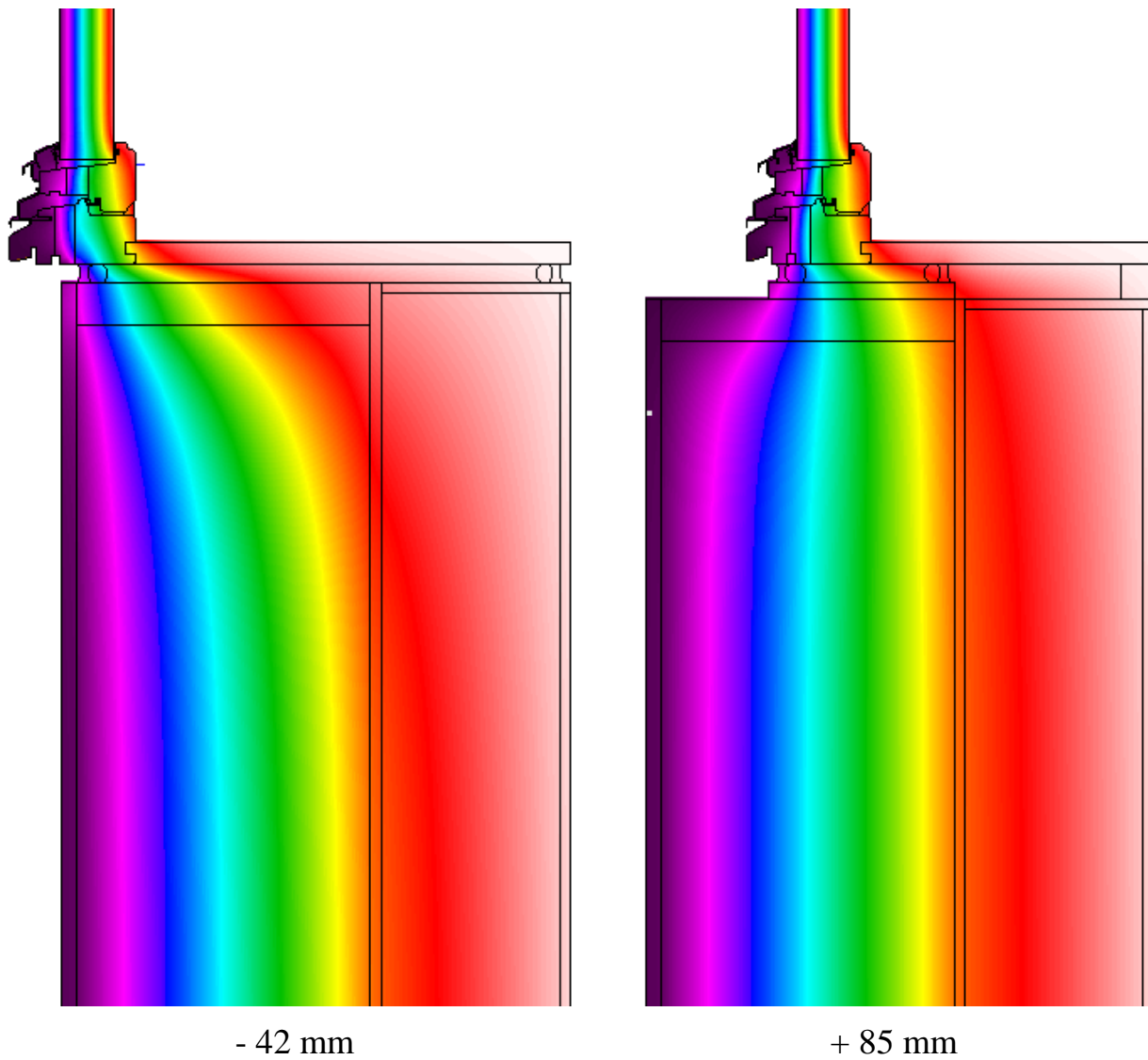


## VEDLEGG 3

---

### Vegg av porebetongblokker med utvendig isolert utlekting

*Fargeplott av temperaturfordeling for to vindusplasseringer.*



## VEDLEGG 3

### Vegg av lettklinkerblokker med innvendig isolering

Fargeplott av temperaturfordeling for tre vindusplasseringer. Isotermer for vindusplassering ytterst i vegglivet.

