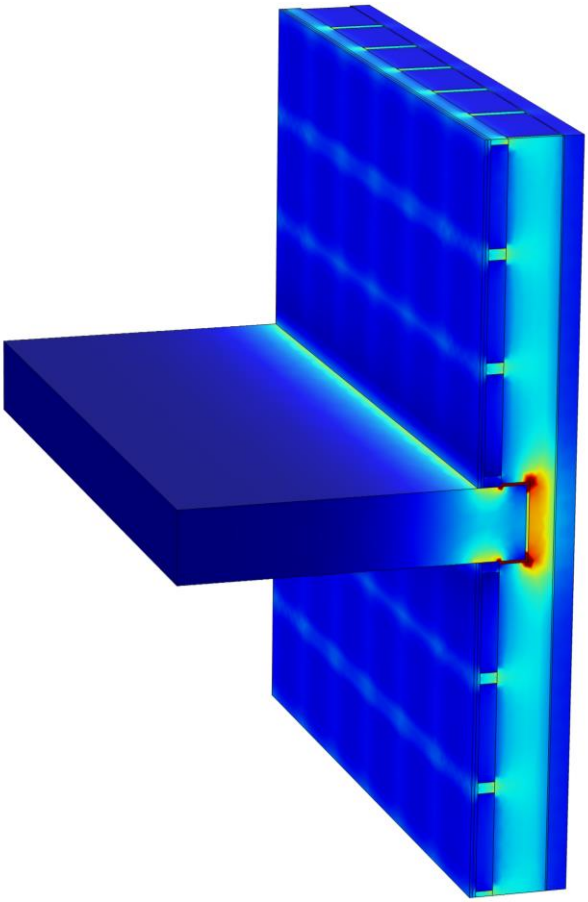
CHALMERS



Utvärdering av köldbryggor i byggnader med dagens standarder

En jämförelse mellan handberäkning, 2D- och 3D-beräkningar

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Byggingenjör

JOHAN HANSSON
MATTIAS RUNDBERG

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Examensarbete BOMX03-17-11
Göteborg, Sverige 2017

EXAMENSARBETE BOMX03-17-11

Utvärdering av köldbryggor i byggnader med dagens standarder

En jämförelse mellan handberäkning, 2D- och 3D-beräkning

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

JOHAN HANSSON

MATTIAS RUNDBERG

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2017

Utvärdering av köldbryggor i byggnader med dagens standarder
En jämförelse mellan handberäkning, 2D- och 3D-beräkning
Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

JOHAN HANSSON

MATTIAS RUNDBERG

© JOHAN HANSSON, MATTIAS RUNDBERG, 2017

Examensarbete BOMX03-17-11 / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2017

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Anslutning mellanbjälklag möter yttervägg, Total heat flux magnitude W/m^{2}K. Författarnas egen bild.

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg, 2017

Utvärdering av köldbryggor i byggnader med dagens standarder

En jämförelse mellan handberäkning, 2D- och 3D-beräkning

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

JOHAN HANSSON
MATTIAS RUNDBERG
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggnadsfysik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING
Allt eftersom dagens byggnader blir mer välisolerade på grund av skärpta energikrav och en större klimatmedvetenhet, spelar värmeförluster genom köldbryggor större roll för en byggnads totala värmeläckage. Detta på grund av att större andel energi transmitteras ut genom köldbryggor. Branschen eftersöker mer verklighetstrogna tillvägagångssätt för att beräkna värmeförluster genom köldbryggor. Vid beräkningar av köldbryggor idag används vanligtvis modeller i 2D, även utvärdering genom förbestämda värden är förekommande. Vid beräkning med dessa metoder förenklas konstruktionen, vilket i vissa fall kan leda till att tredimensionella effekter vid sammansatta materialskikt förbises och att det framräknade resultatet blir missvisande. Med moderna datorsimuleringsprogram finns möjligheten att utföra utförliga beräkningar i tre dimensioner, vilka ger ett resultat som ligger nära det verkliga utfallet.

Syftet med rapporten är att testa pålitligheten genom att jämföra resultat från olika beräkningsmetoder för värmetransmission genom byggnadsdelar med köldbryggor vilka är utförda med dagens isoleringskrav. Beräkningsmetoderna som utvärderas är handberäkningar och numerisk beräkning i två och tre dimensioner. Beräkningarna är i huvudsak utförda med förespråkade metoder enligt ISO-standarder. De utvärderade byggnadsdelarna är kontrollerade att de uppnår dagens standarder enligt Boverkets byggregler 2016.

Arbetet har utförts på avdelningen byggteknik på ÅF Infrastucture AB i Göteborg och på institutionen för bygg- och miljöteknik på Chalmers. Författarna har valt att avgränsa arbetet till att inte studera fönster, dörrar och andra utmärkande konstruktionsdetaljer som tillexempel pelare eftersom det skulle bidra till en komplex och stor studie.

Författarna har fått varierande resultat mellan de olika beräkningsmetoderna. Dessa kan i många fall härledas till tredimensionella effekter som inte beaktas när materialskikt beräknas som sammansatta. Generellt uppgår skillnaderna mellan utvärdering i 2- och 3D till maximalt ett par procent. Resultat har även förekommit där skillnaderna uppgår till 28 %, detta förklaras genom att beräkningsmetoderna skiljer sig åt och beaktar olika parametrar för samma byggnadsdel.

Generellt kan nämnas att noggrannheten ökar när byggnadsdelar analyseras i fler dimensioner. Effekterna av tredimensionella beräkningar kan ofta anses vara väldigt liten och i många fall försumbara. Detta eftersom de framräknade resultaten enbart är teoretiska och det är det praktiska utförandet som påverkar den slutgiltiga värmeledningsförmågan. Med hänsyn till resultatet från denna rapport, rekommenderar författarna utvärdering i två dimensioner. Dock rekommenderas vidare studier på fler konstruktionstyper för kunna ge mer generella råd.

Nyckelord: Byggnadsfysik, köldbryggor, energieffektivisering, COMSOL Multiphysics®.

Calculations of Thermal Bridges on Modern Houses

A Comparison between calculations by hand, 2D- and 3D

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

JOHAN HANSSON
MATTIAS RUNDBERG
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of Building Technology
Building physics
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

When modern buildings becomes more well-insulated due to increased energy requirements and a greater climate awareness, thermal losses from thermal bridges generate larger impact on the building's total heat loss. This is because larger proportions of heat is transmitted through thermal bridges instead of insulated walls. There are also estimation errors of the actual outcome by simplifying reality and making less accurate assumptions. Therefore we can see greater significance of providing more accurate energy performance calculations. With calculations in 3D, there is an opportunity to achieve results that is closer to the real outcome.

The purpose of the report is to test reliability and compare the results of different methods of calculations for heat transmission through buildings with thermal bridges and today's insulation requirements. With a comparison of the results, the purpose is to provide suggestions for methods that would be a better fit for modern building energy calculations. By analyzing the building components according to today's standards of insulation and calculations.

The work has been carried out at ÅF Infrastucture AB in Gothenburg and at the Department of Building and Environmental Engineering at Chalmers. The authors have chosen to exclude windows, doors and other distinctive details as pillars, from the report because it would contribute to a complex and large study.

The authors have had some deviant results between the different methods of calculation. These can in many cases be derived from three-dimensional effects that’s not taken into account when materials are combined for 2D analyzes. Results have also been found where differences are derived from the methods of calculation being different and considering different parameters.

Generally, the accuracy of the results are increased when buildings are analyzed in three dimensions. This is because buildings are constructed with several different materials. This creates complex structures where material layers are to be broken by other construction details which makes it harder to calculate.

The authors has accomplished interesting results highlighting the importance of three-dimensional effects. This result will contribute to future more accurate analyzes of buildings' actual energy losses.

Key words: Building physics, building technology, thermal bridge, insulated buildings, energy efficiency, COMSOL Multiphysics®, hand calculations.

Innehåll

SAMMANFATTNING I
ABSTRACT II
INNEHÅLL III
FÖRORD V
BETECKNINGAR VI
ORDLISTA VI

1 INLEDNING 1
1.1 Bakgrund till examensarbetet 1
1.2 Syfte 1
1.3 Avgränsning 2
1.4 Metod 2

2 TEORI 3
2.1 Värmetransport 3
2.1.1 Värmemotstånd och U-värde 3
2.2 Definition och varianter av köldbryggor 4
2.2.1 Konsekvenser av köldbryggor 5
2.2.2 Accepterade analysmetoder av köldbryggor 5
2.2.3 Krav från Boverket 6

3 KÖLDBRYGGOR SOM UNDERSÖKS 7
3.1 Bakgrund till val av undersökta konstruktionsdetaljer 7
3.2 Antaganden för modeller 7
3.2.1 Antagande om regeltyp 7
3.2.2 Antagande om luftspalt 8
3.2.3 Antagande om materialparametrar 8
3.2.4 Antagande om begränsning av köldbryggans längd 9

4 BERÄKNINGSMETODER 11
4.1 Handberäkningar 11
4.1.1 Byggnadsdelar med sammansatt materialskikt 12
4.2 Analys i COMSOL Multiphysics® 13
4.2.1 Tillvägagångssätt för att ta fram köldbryggor 13
4.2.2 Uppbyggnad av beräkningsmodell och randvillkor 14
4.2.3 Numeriska beräkningar 15
4.2.4 Kvalité på elementindelning – Mesh independence 16
4.2.5 Resultat av analys/Study 17
4.3 Beräkning av platta på mark, kantbalk och mark 18
4.3.1 Metod vid numerisk analys 18

4.3.2 Storlek på beräkningsmodell vid numerisk analys 19
4.3.3 Handberäkning i mark 19

5 RESULTAT 21

5.1 Jämförelse av U-värde mellan beräkningsmetoderna 21
5.1.1 Yttervägg med korslagda regelskikt 21
5.1.2 Takkonstruktion med fanérbalk 22
5.1.3 Golv av typ ”platta på mark” 24

5.2 Byggnadsdelar med köldbryggor 25
5.2.1 Mellanbjälklag möter yttervägg 25
5.2.2 Ytterväggshörn 28
5.2.3 Ytterväggshörn möter mellanbjälklag, Punktköldbrygga 34
5.2.4 Takfot möter yttervägg 30
5.2.5 Kantbalk 31

5.3 Sammanfattning av resultat 35
5.3.1 Tabell för referensfall. 36
5.3.2 Tabell över byggnadsdelar med köldbryggor 36

6 DISKUSSION 37

6.1 Felkällor 38

7 SLUTSATS 39

7.1 Förslag till framtida arbeten 39

8 LITTERATURFÖRTECKNING 40

BILAGA – BERÄKNINGAR OCH RESULTAT

Förord

Detta examensarbete är en del av slutfasen i byggingenjörsutbildningen på Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg. Programmet består av 180 högskolepoäng och arbetet motsvarar 15 högskolepoäng. Examensarbetet har skrivits på institutionen Bygg och miljöteknik, på avdelning Byggnadsteknologi i samarbete med konsultföretaget ÅF Infrastructure AB, avdelning byggteknik, i Göteborg.

Författarna till denna rapport vill rikta ett stort tack till våra handledare för stöd och vägledning under arbetets gång. Angela Sasic Kalagasidis examinator och handledare och Tommie Månsson handledare, båda på avdelning Byggnadsteknologi. Keyvan Zeidi och Åsa Magnevik handledare ÅF Infrastructure AB avdelning Byggteknik.

Med en färdig rapport i handen har författarna utvecklat färdigheter gällande bland annat rapportskrivning, modellering i COMSOL och att tolka ritningar för att sedan överföra dessa från 2D till 3D-modeller. Trots många missade hemmakvällar har arbetet varit väldigt roligt och utvecklande. Efter många timmar av ihärdigt arbete har författarna fått kunskaper i ett nytt datorberäkningsprogram. Detta har medfört förståelse för avancerad modellering av konstruktionsdetaljer.

Göteborg maj 2017
Johan Hansson, Mattias Rundberg

Beteckningar

Aom	Omslutande invändig area av klimatskärmen mot uppvärmd inneluft [m^2]
λ	Specifik värmekonduktivitet (lambda) [W/mK]
Ψ	Värmegenomgångskoefficient för linjära köldbryggor (psi) [W/mK]
χ	Värmegenomgångskoefficient för punktformiga köldbryggor (chi) [W/K]
Q	Värmeflöde [W]
Um	Byggnads genomsnittliga värmegenomgångskoefficient [W/m^2K]
R	Värmemotstånd [m^2K/W]
Rsi	Inre värmeövergångsmotstånd [W/m^2K]
Rse	Yttre värmeövergångsmotstånd [W/m^2K]
ΣUA	Total transmissionsförlust genom klimatskalet [W/K]
$\Sigma \Psi k$	Total transmissionsförlust genom köldbryggor [W/K]

Ordlista

Värmeövergångskoefficient	Värmeövergångsmotstånd för material som vetter mot luft
Transmissionsförlust	Värmeläckage på grund av energiöverföringar i klimatskalet.
Värmekonduktivitet	Ett materials förmåga att leda värme, även kallat värmeledningsförmåga.
U-värde	Koefficient som beskriver en byggnadsdels isoleringsförmåga, även kallat värmeöverföringskoefficient.
Klimatskal	Byggnadsdelar som angränsar mot yttre omgivningen, även kallat klimatskärm.

1 Inledning

1.1 Bakgrund till examensarbetet

Bostäder står idag för en stor del av Sveriges totala energianvändning. De senaste åren har klimatmedvetenheten ökat, med detta har energianvändningen i bostäder och lokaler ifrågasatts. För att minska energiåtgången i byggnader har Sveriges riksdag beslutat att alla nya byggnader från 2021 skall vara så kallade ”nära nollenergibyggnader” (Regeringskansliet, 2015). Detta innebär att det ställs hårdare krav på byggbranschen, dels genom att minska energiförluster genom klimatskalet men även på noggrannheten i energiberäkningar.

Allt eftersom dagens byggnader blir mer välisolerade på grund av skärpta energikrav och en större klimatmedvetenhet spelar värmeförluster genom köldbryggor större roll för en byggnads totala värmeläckage. Detta på grund av större andel energi transmitteras ut genom köldbryggor (Gölén & Persson, 2012). Ett välisolerat hus med bristande konstruktionslösningar som orsakar köldbryggor, minskar nyttan av den ökade mängden isolering. Inte minst ur ett miljömässigt och ekonomiskt perspektiv men även i minskad boendekvalité. En alltför betydande uppskattning av köldbryggor kan leda till att byggnaden inte uppnår energikraven vid mätning i efterhand. Att ändra på byggnadens energiprestanda i efterhand kan bli väldigt kostsamt (Wingård, 2009). På grund av detta efterfrågas mer studier inom området.

Idag finns det olika sätt att beräkna köldbryggor, dessa har olika noggrannhet som påverkar de framräknade resultaten. Med hänsyn till detta vill författarna studera skillnaderna i resultat mellan de olika beräkningsmetoderna för att kunna utvärdera eventuella beräkningsantaganden. I branschen används ofta förenklingar i energiberäkningar för att minska beräkningsarbetet. När konstruktionsdetaljer blir mer komplexa leder förenklingarna till en osäkerhet i beräkningarna. För att kompensera detta överskattas resultaten för att säkerställa att det finns marginal i slutresultatet mot energikraven.

Avdelningen byggteknik på ÅF Infrastructure AB i Göteborg, benämns vidare ÅF, vill med hänsyn till detta utreda skillnader i resultat mellan olika energiberäkningsmodeller för köldbryggor. Detta för att vara väl förberedda på morgondagens marknad och kunna möta branschens önskemål om mer utförliga energiberäkningar.

1.2 Syfte

Med examensarbetet avser författarna att ta fram och jämföra resultat av olika beräkningsmetoder för transmissionsförluster genom köldbryggor och konstruktionsdetaljer ritade med dagens standarder enligt BBR 2016. Genom att utvärdera en köldbrygga på flera noggrannhetsnivåer är syftet att jämföra resultat från olika beräkningssätt. Genom att göra antaganden med hänsyn till den verkliga geometrin av byggnadsdelen kommer arbetet jämföra de olika beräkningsmetoderna och granska deras noggrannhet. Med resultaten ska författarna sedan föreslå vilka metoder som är lämpliga för beräkning av konstruktionsdetaljer med dagens standarder.

1.3 Avgränsning

Konstruktionsdetaljerna och köldbryggorna som studeras grundas på ritningsdetaljer från ett av ÅFs nyligen avslutade projekt för att få ett urval av konstruktionsdetaljer som speglar dagens standarder. Energiberäkningsprogrammet som studien använder är COMSOL Multiphysics® v.5.2. Detta då det är ett välkänt beräkningsprogram inom branschen samt att licenser och handledning för detta program finns att tillgå från institutionen Bygg och miljöteknik på Chalmers. Fönster och dörrar i klimatskalet har exkluderats från rapporten och därmed inte undersökts. I rapporten har takfot-ytterväggg, mellanbjälklag-ytterväggg, ytterväggshörn, kantbalk och punktköldbrygga för ytterväggshörn mot mellanbjälklag studerats för att kunna göra utförliga analyser av beräkningsmetoder.

1.4 Metod

Möte och kontakt med handledare på Chalmers och ÅF har skett kontinuerligt under projektet. Redovisning och skrivande av rapportens delar har skett löpande under projektets gång. En loggbok har även förts för att kunna utföra självgranskning samt vara till hjälp vid sammanställandet av slutrapport.

Genom att beräkna värmetransmissionsförluster på ett antal vanligt förekommande konstruktionsdetaljer och köldbryggor med olika beräkningsmetoder kommer rapporten att väga resultaten mot varandra. Detta för att ge en fingervisning för framtida mer effektiva val av beräkningsmetoder.

Beräkningsmetoderna som kommer användas för att analysera värmetransmission är, handberäkningar samt numerisk analys i 2D och i 3D. För att jämföra felen i beräkningsmetoderna studeras U-värden för byggnadsdelar med alla metoder. I de numeriska analyserna studeras konstruktioner med köldbryggor på likartat sätt med avseende på värmetransmission genom konstruktionsdelen. För att ta fram köldbryggor i den numeriska analysen tas två modeller av varje konstruktionsdel fram. En modell motsvarar verkliga geometri och en modell fungerar som referensfall. Referensfallet ska motsvara samma resultat som tas fram i handberäkningen, d.v.s. utan inverkan av köldbrygga. Köldbryggan tas sedan fram genom att subtrahera skillnaden i värmetransmission mellan de två fallen.

Handberäkningarnas begränsningar sätter nivån för modellernas komplexitet vid U-värdesberäkningen. För att kunna analysera en modell i 3D kommer en bearbetning från 2D till 3D göras i ritningsprogrammet Autodesk AutoCAD®. Antaganden i modellerna har anpassats för att kunna utföra alla beräkningsmetoder. Modellerna är anpassats efter dagens isoleringskrav och standarder. Resultaten sammanställas och jämförs i kapitlet Resultat.

2 Teori

Det här kapitlet behandlar krav och grundläggande teori om energianvändning i byggnader samt definition av köldbrygga. Genom att inledningsvis beskriva teori om värmetransport fås förståelse för kommande antaganden.

2.1 Värmetransport

Värmetransport sker på flera olika sätt och delas in värmeledning, värmestrålning och konvektion. Värmeledning har temperaturskillnader i material som drivkraft. Värmestrålning innebär att värme strålar från varmare till kallare ytor. Konvektion drivs av lufttrycksskillnader, vilket betyder att värme överförs med luft eller gas som bärare (Peterson, 2013).

Vidare tas en specifik värmekonduktivitet, λ-värde, fram för olika material. Värmekonduktivitet benämns vidare värmeledningsförmåga för att öka förståelsen för begreppet. Värmeledningsförmågan anger materials förmåga att transmittera värme och skrivs med enhet W/mK (Peterson, 2013, s. 147).

2.1.1 Värmemotstånd och U-värde

Värmemotstånd, R, beräknas för en byggnadsdels som en kvot av tjockleken genom värmeledningsförmågan med enhet m^2K/W. Värmemotstånd beskrivs med (Ekv. 1).

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad \text{Värmemotstånd med hänsyn till ledning } [m^2K/W] \qquad \text{(Ekv. 1)}$$

För material som är i kontakt med luft tillkommer ett värmeövergångsmotstånd. Detta värmeövergångsmotstånd kommer från det konvektiva värmeutbytet som sker med luft som förflyttas längs en väggs yta, men också från ett strålningsutbyte med omgivningen (Peterson, 2013, s. 259). Värmeöverföringskoefficienterna ger därför två tillägg till totala värmemotståndet för en byggnadsdel. Dessa värden beror på olika parametrar som årstid och vindhastighet men även på vilken byggnadsdel som analyseras.

Medelvärden för värmeövergångsmotstånd finns presenterade i (Swedish Standard Institute, SS-EN ISO 6946:2007, §5.2). För mer korrekt beräkning av värmeövergångsmotstånden beskriver (Hagentoft, 2001) en mer avancerad metod som baseras på klimatdata. Fokus i rapporten är att analysera specifika konstruktionsdetaljer och köldbryggor, därför kommer medelvärden användas från Swedish Standard Institute.

Vid implementering av övergångsmotstånden för numeriska beräkningar används Heat transfer coefficient, h, vilken är inversen av övergångsmotståndet för respektive byggnadsdel. En noggrannhet på två decimaler har använts i arbetet, de värdena som används redovisas i Tabell 1.

Tabell 1. Övergångsmotstånd för ytor i kontakt med omgivande luft.

Värmeövergångsmotstånd för ytor angränsande mot luft, Rs.	Rs	Heat transfer coefficient/ Värmeöverföringskoefficient
Värme som transporteras horisontellt (Rsi)	0,13	7,69
Värme som transporteras uppåt (tak)	0,1	10
Värme som transporteras nedåt (golv)	0,17	5,88
Värme som transporteras horisontellt (Rse)	0,04	25

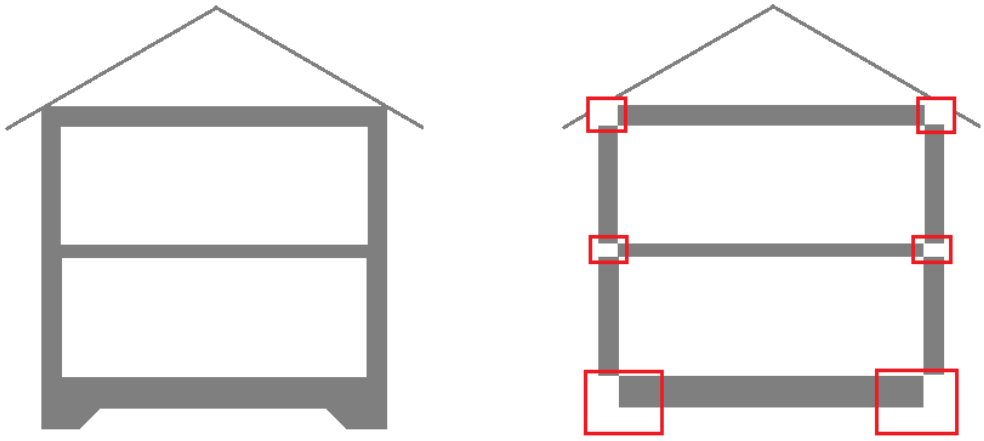
För att bestämma en konstruktions totala värmemotstånd summeras alla värmemotstånd. Då erhålls väggens totala värmemotstånd, R_T. I byggbranschen används ofta värmegenomgångskoefficienten vilket är inversen på R_T , vanligtsvis kallas detta för byggnadsdelens U-värde och har enheten W/m^{2}K. Ett lågt U-värde betyder att byggnadsdelens isoleringsförmåga är hög och det sker när totala värmemotståndet, R_T, är stort. U-värdet anger värmetransmissionen vinkelrätt genom väggen i 1 dimension per kvadratmeter och grad Kelvin och är därmed oberoende av bredd och höjd för byggnadsdelen.

Värmeflödet genom en byggnadsdel går att räkna fram i enheten Watt, W. U-värdet multipliceras med temperaturdifferensen över väggen, ΔT, och arean, A, för väggen (Peterson, 2013, s. 247). Ekvationen för värmeflödet visas nedan i (Ekv.2).

$$Q = U * \Delta T * A \qquad \text{Värmeflöde [W]} \qquad \text{(Ekv. 2)}$$

2.2 Definition och varianter av köldbryggor

Köldbryggor i byggnader betecknar en del i klimatskalet där värmemotståndet är lägre än omgivande byggnadsdelar. Detta sker bland annat där byggnadsdelar möts och möjligheten för isolering minskar, ofta på grund av att bärande konstruktioner möts. Vidare leder detta till förhöjd värmetransmission genom klimatskalet. Det finns huvudsakligen tre typer av köldbryggor, linjära köldbryggor, punktformiga köldbryggor samt köldbryggor i klimatskärmen. Med köldbryggor i klimatskärmen avses till exempel, återkommande träreglar, kramlor och takstolar. Dessa medräknas normalt i det U-värdet som är framräknat för varje specifik byggnadsdel (Boverket, 2012).



Figur 1. Exempel på förenklingar som uppkommer vid handberäkning, effekter från köldbryggor utesluts vilket visas i bilden till höger. I de röda rektanglarna visas vanligt förekommande linjära köldbryggor.

Linjeköldbryggor är kontinuerliga konstruktioner som transmitterar mer värme än motsvarande närliggande byggnadsdelar. Vanliga exempel är en kantbalk av betong som bär en yttervägg, mellanbjälklagsanslutningar till yttervägg samt takanslutning mot yttervägg. Dessa visas i Figur 1. Värmegenomgångskoeffcienten för köldbryggan betecknas med, Ψ, och beräknas genom att räkna ut skillnaden för ett fall som inkluderar köldbryggan mot ett referensfall där köldbryggor utesluts. Linjära köldbryggor har enheten W/mK (Boverket, 2012).

Punkformiga köldbryggor uppkommer i genomföringar genom klimatskalet men även vid tre-dimensionella anslutningar så som möte mellan tak och vägghörn. För punktformiga köldbryggorna betecknas värmegenomgångskoefficienten med, χ, och mäts i enheten W/K. På likartat sätt som för linjära köldbryggor beräknas, χ, ut som skillnaden mellan ett verkligt fall och ett referensfall. Vanligtvis beräknas inte punktformiga köldbryggor, detta då värmetransmissionen är liten i förhållande till övriga värmeförluster genom klimatskalet (Boverket, 2012).

Om en byggnad inte har en rektangulär geometri utan förskjutna eller utstickande delar skapas inre kanter. Exempelvis vid slitsar eller invändiga hörn. Dessa har en större yta mot uppvärmd luft per del utsida än en traditionell väggyta. Detta innebär att invändiga hörn inte har någon negativ inverkan på värmeflödet utan istället positiv, att mindre värme då passerar ut genom byggnadsdelen än närliggande byggnadsdelar (Danebjer & Ekström , 2012). Inre kanter och hörn analyseras inte vidare i denna rapport.

2.2.1 Konsekvenser av köldbryggor

Köldbryggor leder till att mer energi läcker ut ur klimatskärmen vilket innebär större kostnader för uppvärmning, vilket är dåligt ur ett totalekonomiskt men även miljömässigt perspektiv (Engström & Karlsson , 2016). En högre värmetransmission genom klimatskalet medför högre temperatur på klimatskalets utsida. Begreppet köldbrygga kan därför anses vilseledande och borde därför benämnas värmebrygga (Karlsson & Mani, 2015).

Vidare leder köldbryggor till ett sämre termiskt klimat inomhus. Det kan innebära att en person upplever att klimatskalet är kallare vid anslutningar av byggnadsdelar jämfört med resterande byggnadsdelar. Temperaturen sänks i klimatskalet vilket orsakar risk för kondens då den relativa fuktigheten ökar. Det kan även leda till missvisande värden om en termometer eller termostat placeras av misstag i närheten av en köldbrygga. Ett annat värde kan då registreras än vad som är sökt (Gölén & Persson, 2012).

2.2.2 Accepterade analysmetoder av köldbryggor

Det finns olika sätt att beräkna köldbryggor och de baseras på vilken noggrannhet som efterfrågas i energiberäkningarna. Metoderna som accepteras enligt (Swedish standard institute, SS-EN ISO 14683:2007) är följande:

- Numerisk analys av köldbryggor i datorberäkningsprogram
- Färdigt detaljbibliotek med helt eller delvis bestämda parametrar
- Handberäkningar
- Standardutförda värden från tabell av beräknade köldbryggor

Mest noggrann är numerisk analys av köldbryggor i datorberäkningsprogram, vilken beskrivs i (Swedish Standard Insitute, SS-EN ISO 10211:2007). Metoden uppskattas ge en felsäkerhetsmarginal på 5 %.

En annan accepterad metod är att använda ett färdigt detaljbibliotek med helt eller delvis bestämda parametrar, vilka ska vara modellerade i enlighet med (Swedish Standard Insitute, SS-EN ISO 10211:2007). Detta ger resultat med en osäkerhet på ca 20 %.

Nästa accepterade metod är handberäkning av köldbrygga innehållande korrekta dimensioner, materialens värmeledningsförmågor och aktuella övergångsmotstånd. Handberäkningar förväntas ge en osäkerhet på 20 %.

Vidare accepteras standardutförda värden även kallat schablonvärden, baseras på ett detaljbibliotek redovisat i (Swedish Standard Insitute, SS-EN ISO 14683:2007). Dessa exempel är tydligt presenterade och representerar ett fall med sämre isoleringsmöjligheter. Detta ger användaren av dessa exempel ett resultat som är överskattat och på så sätt ger en positiv säkerhetsmarginal vid kontroll i efterhand. Metoden ger ett resultat som motsvarar en felsäkerhetsmarginal som varierar mellan 0 % och 50 %.

2.2.3 Krav från Boverket

I Boverkets byggregler kapitel 9, finns det energikrav som nya byggnationer måste klara av. Det är krav som måste beräknas och godkännas innan bygglov erhålls, dessa kan kontrolleras och mätas efter färdigställandet av byggnaden i samband med slutbesked. Det som skall redovisas är byggnadens specifika energianvändning, samt genomsnittlig värmegenomgångskoefficient, U_m. Den genomsnittliga värmegångskoefficienten är samma för hela landet. Det krävs ett lägre U_m än 0.4 W/m^{2}K för småhus och flerbostäder. För lokaler är samma siffra 0.6 W/m^{2}K (Boverket, 2016).

Det finns alternativa krav på byggnadens energianvändning, vilka kan användas för att verifiera byggnaden om den uppvämda golvytan är mindre än 100 m^2, inget kylbehov finns, samt fönster och dörrar uppgår till högst 20 % av byggnadens uppvärmda väggarea. Den högsta värmegenomgångskoefficienten U_i bör inte överskrida de värden som anges i kapitel 9:4 för byggnadsdelar i klimatskärmen (Boverket, 2016). Byggnadsdelar som uppnår kraven för U_i i kap 9:4 i BBR har författarna valt att klassa som dagens standard och används i rapporten. Värdena är angivna utan påverkan från köldbryggor och visas i Tabell 2.

Tabell 2. Tillåtna U-värden för byggnadsdelar (Boverket 2016).

	Maximalt tillåtna U-värden enligt (Boverket, 2016), *Ui*, för byggnad med annat uppvärmningssätt än elvärme (W/m^{2}K).
*U*tak	0,13
*U*vägg	0,18
*U*golv	0,15

3 Köldbryggor som undersöks

Det här kapitlet förklarar antaganden som gjorts för att kunna utföra beräkningar av köldbryggor. Antaganden som genomförs bygger på ingenjörsmässiga resonemang och påverkar resultaten, dessa är därför en vital del av arbetet.

3.1 Bakgrund till val av undersökta konstruktionsdetaljer

Modellerna grundas på ritningsunderlag från ett av ÅFs nyligen avslutade projekt men på grund av många förändringar av detaljer liknar inte längre modellerna ursprungliga referensobjektet. Se antaganden för modeller i kapitel 3.2. Även om arbetet frångått från ritningsdetaljerna så har författarna kontrollerat att byggnadsdelarna uppfyller kraven enligt BBR 2016. Då ingen fysisk byggnad har undersökts har gränserna tagits från de alternativa kraven på varje enskild byggnadsdel i klimatskalet. Modellerna har enligt handberäkningar ett lägre U-värde än kraven på byggnadens energianvändning enligt kap 9:4 i BBR 2016. Vilka redovisas i W/m^2K i Tabell 2.

Undersökta konstruktionsdetaljer visas i punktform nedan. Modellernas utseende redovisas mer utförligt i kapitel 5. Vid komplicerade köldbryggor har det verkliga fallet prioriterats vid modellering förutsatt att det kan jämföras med andra beräkningsmetoder. De undersökta köldbryggorna är utvalda efter vanligt förekommande detaljer i byggnader. Linjeköldbryggorna är frekvent förekommande i byggnader och dessa går att analysera i både 2D och 3D. En byggnad består även av punktköldbryggor men dessa köldbryggor går inte att analysera i 2D. Mellanbjälklag möter ytterväggshörn är den enda punktköldbrygga som modellerats. Nedan listas de undersökta detaljerna.

- Flerdimensionella effekter i yttervägg (handberäkning, 2D och 3D)
- Flerdimensionella effekter i tak (handberäkning, 2D och 3D)
- Flerdimensionella effekter i golv (handberäkning, 2D och 3D)

- Mellanbjälklag möter yttervägg (2D och 3D)
- Ytterväggshörn (2D och 3D)
- Takfot möter yttervägg (2D och 3D)
- Kantbalk (Antaganden om marken behövs) (2D och 3D)

- Punktköldbrygga mellanbjälklag möter ytterväggshörn (3D)

3.2 Antaganden för modeller

För att kunna analysera modeller i COMSOL® har några antaganden gjorts. Dessa antagande är bland annat förenklingar av konstruktioner för att underlätta modelleringen av detaljrika geometrier. Andra orsaker som påverkat antagandena är jämförelsen mellan beräkningsmetoderna. Några beräkningsmetoder medför vissa begränsningar. Se kapitel 4 för beräkningsmetoder.

3.2.1 Antagande om regeltyp

I dagens konstruktioner används ofta stålreglar, bland annat för att åstadkomma ett lågt U-värde på konstruktionen. Stålreglar ger ett lägre U-värde jämfört med traditionella träreglar tack vare en betydligt mindre volym och genomtänkt geometri, trots en hög

värmeledningsförmåga hos stålet. För att studera inverkan av en stålprofil som bryter ett isolerande skikt används standarden (Swedish Standard Institute, SS-024230:1989). Denna standard beskriver beräkningsmetoder för noggrann analys av stålreglar där ett värmemotstånd för stålprofilens alla ingående delar räknas ut steg för steg. Då stålreglar har en komplex form komplicerar det även modelleringsarbetet avsevärt, se Figur 2. Vid analys i COMSOL av en sådan tunn och detaljrik geometri kräver programmet en fin uppdelning av element även kallat mesh. För att inom rimlig tid kunna få ut ett användbart resultat har författarna valt träreglar för att minska modelleringstiden och för att den tillgängliga datorkraften inte varit tillräcklig.

Figur 2. Lindab RY220 profil. Bilden visar geometri för stålregel (Lindab, 2017). Återgiven med tillstånd.

3.2.2 Antagande om luftspalt

Enligt (Swedish Standard Institute, SS-EN ISO 6946:2007) finns det tre sätt att beakta inverkan av luftspalter. Dessa beror på ventilationsmöjligheterna och indelas i oventilerad luftspalt, välventilerad luftspalt och ett fall däremellan som kallas ”slightly ventilated air layer”.

Luftspalten är välventilerad om ytan för ventilationsöppningen är större än 1500 mm^2 per längdmeter. Med dagens standard är det vanligt förekommande med ventilerad fasad när stommen består av trä. En välventilerad luftspalt innebär att alla materialskikt utanför luftspalten kan ersättas med värmeövergångsmotståndet för inneklimat, Rsi. Orsaken till att Rsi kan användas är att fasaden skyddar mot vind och begränsar luftströmmar längs materialet bakom fasaden. Det har antagits att fasaden och taket är välventilerat, vidare innebär det att alla material utanför luftspalten har exkluderats i beräkningarna och ersatts med värmeövergångsmotståndet för motsvarande innerytor.

Att anta att en byggnadsdel är välventilerad ger ett högre U-värde för byggnadsdelen jämfört med oventilerad luftspalt. För oventilerad luftspalt gäller att luft inte kan utbytas till omgivningen vilket ger ett lägre U-värde för byggnadsdelen.

3.2.3 Antagande om materialparametrar

För alla beräkningar genom rapporten har förbestämda materialparametrar för värmeledningsförmåga använts. Värden för värmeledningsförmåga är samlad i Tabell 3 nedan.

Tabell 3. Värmeledningsförmåga hos undersökta material.

Materialparametrar			
Material	*Värmekonduktivitet, λ*	*Enhet*	
Betong	1,7	W/mK	Petersson, 2013
Armerad betong	1,9	W/mK	Engström & Karlsson, 2016
Stål	60	W/mK	Petersson, 2013
Konstruktionsvirke	0,14	W/mK	Petersson, 2013
Träspånskiva	0,14	W/mK	Petersson, 2013
Fasadboard	0,033	W/mK	Petersson, 2013
Mineralull	0,033	W/mK	Petersson, 2013
EPS Isolering för Mark (EPS 20)	0,036	W/mK	Petersson, 2013
Gips	0,22	W/mK	Petersson, 2013
Cembrit windstopper	0,3	W/mK	Cembrit AB, 2013
Plywood/Fanérbalk	0,13	W/mK	Petersson, 2013
Lösull för tak	0,042	W/mK	Petersson, 2013
Berg	3,5	W/mK	Petersson, 2013

Majoriteten av värdena är hämtade från (Peterson, 2013). Undantag gäller för Armerad betong som hämtats från (Engström & Karlsson , 2016) och Cembrit windstopper från (Cembrit AB, 2013). Engström & Karlsson har gjort antagandet att armerad betong rimligtvis bör ha ett högre λ-värde på 1.9 W/mK på grund av att stål har högre värmeledningsförmåga än betong vilket leder till ett högre slutgiltigt λ-värde för byggnadsdelen. För kontroll av beräkningsmodell för kantbalk har en tidsberoende studie används, då har densitet och specifik värmekapacitet angetts. För mark har författarna använt materialparametrarna för betong för att efterlikna berg. Densitet (2700 kg/m^3) och specifik värmekapacitet, (900 J/kgK). (Peterson, 2013). Ångspärr påverkar inte värmeöverföringen märkbart eftersom dess tjocklek är försumbar och har därför uteslutits ur beräkningarna.

3.2.4 Antagande om begränsning av köldbryggans längd

En köldbrygga kan påverka värmeflödet på andra ställen i en konstruktionsdetalj än de som är direkt kopplade till köldbryggan. Detta leder till svårigheter att säga var köldbryggan slutar. Det finns ett par sätt att begränsa köldbryggor, enligt (Swedish Standard Insitute, SS-EN ISO 10211:2007, §5.2.2) bör en köldbrygga vid modellering avslutas vid:

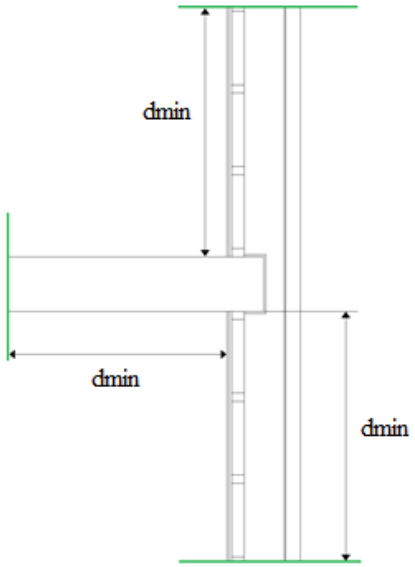
- Symmetriplan om detta ligger på ett avstånd närmare köldbryggans centrum vilket är mindre än dmin.
- Minst dmin.
- Mot mark enligt 5.2.4 i SS-EN ISO 10211:2007

där dmin är det största utav 1 meter eller tre gånger tjockleken hos det berörda elementet.

För att anpassa modellering av verkligheten och referensfall mot handberäkningar har författarna valt att avgränsa köldbryggan i mitten av återkommande skikt så som reglar och balkar. Avgränsningen har skett då det återkommande skiktet uppkommer efter tre gånger tjockleken eller minst 1 meter, vilket vid regelvägg motsvarar tre centrumavstånd. Detta på grund av att återkommande reglar och balkar skapar en lokal köldbrygga där

värmetransporten genom centrum av den lokala köldbryggan anses vara vinkelrät mot byggnadsdelen, vilket skapar ett symetriplan. När adiabatiska gränser sätts i centrum av återkommande skikt ger detta en korrekt jämförelse mot handberäkningars beräkningsmetod, för sammansatta materialskikt som analyseras i 2D ger denna gräns en korrekt avgränsning.

Måttet dmin enligt Figur 3 anger längden för köldbryggan mätt från insida vägg. I rapporten kommer insida vägg användas som referensmått i följande beräkningar för att vara konsekventa med vilka ytor som avses.



Figur 3. Definition av köldbryggas längd. Måtten avser längd för uppvärmd inneluft.

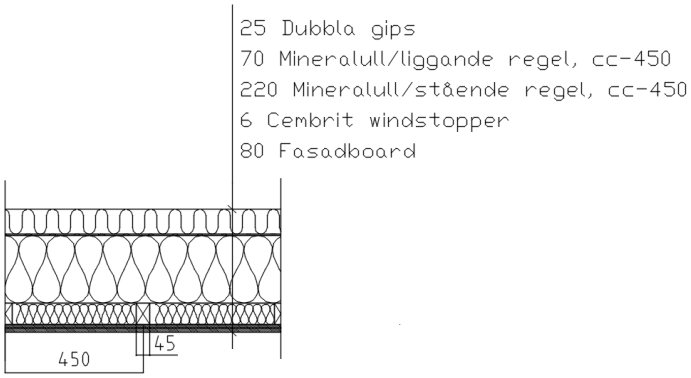
Där köldbryggan slutar sätts så kallade adiabatiska gränser vilket innebär randvillkor där värmemotståndet är oändligt stort så att ingen värme går ut genom snittet, (Swedish Standard Insitute, SS-EN ISO 10211:2007). Adiabatiska gränser visas med grön linje i Figur 3.

4 Beräkningsmetoder

Detta kapitel beskriver vilka beräkningsmetoder som använts. Det går igenom mer i detalj hur beräkningarna har genomförts och hur resultat har tagits fram. De beräkningsmetoder som tas upp är handberäkningar och numeriska beräkningar i datorberäkningsprogrammet COMSOL® för ritningar i 2 och 3 dimensioner.

4.1 Handberäkningar

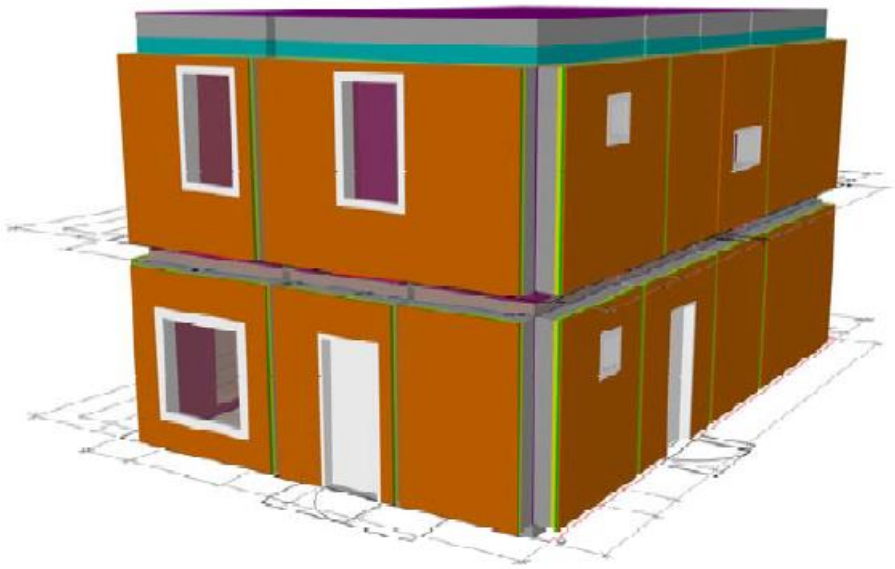
Handberäkningar bygger på teorin som redovisas i kapitel 2.1. Värmetransmission genom en byggnadsdel beräknas genom att använda λ-värden för respektive material. För inhomogena materialskikt skall respektive λ-värde vägas samman med andelen av materialet i skiktet t.ex. reglar/mineralull. Detta beskrivs ytterligare i kapitel 4.1.1. Handberäkningarna motsvarar värmetransmission i 1 dimension, dvs. värmeflödet rakt genom byggnadsdelen. Beräkningarna kräver att modellen snittas vinkelrät mot byggnadsdelen och tar därför inte hänsyn till icke vinkelräta snitt. Exempel på handberäkningsmodell visas i Figur 4. U-värdeberäkningen är oberoende av antalet återkommande centrumavstånd och därför redovisas nedan två centrumavstånd för regelskikten.



Figur 4. Regelvägg med vinkelrät avkapning av byggnadsdel, anpassad för handberäkning.

Vidare beräknas varje materialskikts värmemotstånd genom att beräkna R enligt (Ekv. 1). Därefter läggs varje värmemotstånd R för alla material i byggnadsdelen samman till R_T. För att få fram U-värdet för en byggnadsdel tas inversen på R_T. Detta beräknas för varje byggnadsdel separat, d.v.s. väggar med samma uppbyggnad för sig och sedan för tak, golv mm. Författarna har utfört handberäkningar i kalkylbladsprogrammet Excel.

Nedan illustreras vad som tas i beaktning vid handberäkning av en hel byggnad. Genom att använda area mot uppvärmd inneluft, utesluts geometrier från hörn, visas i Figur 5. Linjeköldbryggor och punktköldbryggor adderas sedan för att få en komplett energiberäkning. Handberäkningar används för att studera separata byggnadsdelar för att utreda skillnader i U-värden.



Figur 5. Illustrering för vad som beaktas vid handberäkning. I anslutningarna mellan byggnadsdelar uppkommer köldbryggor. (Johansson & Månsson, 2013). Återgiven med tillstånd.

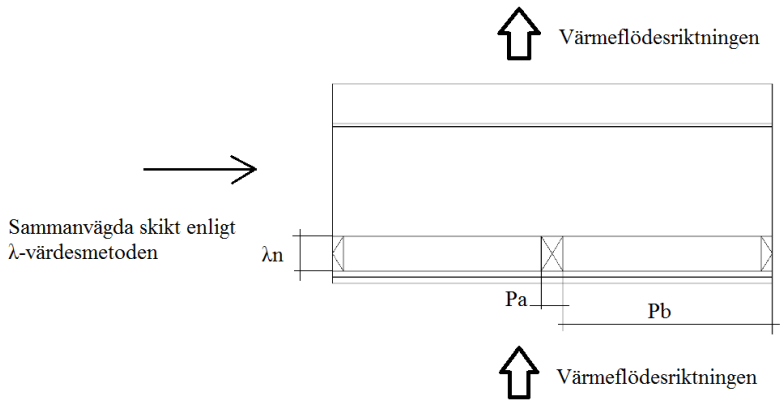
4.1.1 Byggnadsdelar med sammansatt materialskikt

I en byggnad finns ofta inhomogena materialskikt som måste beaktas vid en energiberäkning, exempelvis regelvägg. Det finns två sätt att väga samman inhomogena materialskikt vid handberäkningar, λ-värdesmetoden respektive U-värdesmetoden. λ-värdesmetoden bygger på att byggnadsdelen delas in i planparallella skikt vinkelrätt mot värmeflödesriktningen. I varje skikt vägs ytornas andel, p_i, av de olika materialen samman med respektive λ-värde (Peterson, 2013).

$$\lambda_n = p_A * \lambda_A + p_B * \lambda_B$$

Värmeledningsförmåga sammansatt materialskikt [W/mK] (Ekv. 3)

I Figur 6 nedan visas hur indelningen av sammansatta materialskikt går till enligt lambdavärdesmetoden. λn beräknas med (Ekv. 3).



Figur 6. Sammanvägda skikt enligt λ-värdesmetoden, vinkelrät mot värmeflödesriktningen.

För bestämning av värmemotstånd genom U-värdesmetoden delas istället byggnadsdelen upp i skikt parallellt med värmeflödesriktningen. Byggnadsdelen delas således upp där inhomogena materialskikt uppstår och ett värmemotstånd R_T tas fram. Ett U-värde tas

fram genom att ta inversen på varje enskilt R_T multiplicerat med andelen av byggnadsdelens förekomst i konstruktionen (Peterson, 2013).

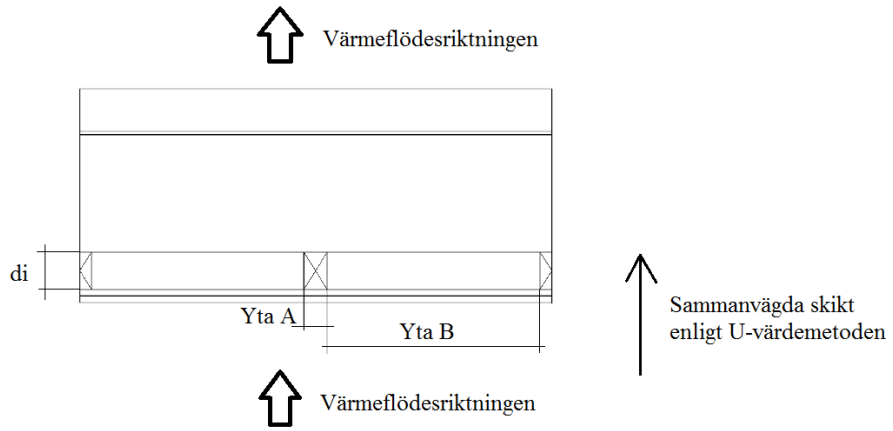
$$R_{TA} = R_{si} + \frac{d1}{\lambda_{A1}} + \frac{d2}{\lambda_{A2}} + \frac{d3}{\lambda_{A3}} + \mathrm{Rse}$$

Värmemotstånd sammansatt materialskikt [m²K/W] (Ekv. 4)

$$U^i = p_A * \frac{1}{R_{TA}} + p_B * \frac{1}{R_{TB}} + p_C * \frac{1}{R_{TC}}$$

Värmegenomgångskoefficient sammansatt materialskikt [W/m²K] (Ekv. 5)

I Figur 7 nedan visas hur indelningen av sammansatta materialskikt går till enligt U-värdesmetoden.



Figur 7. Sammanvägda skikt enligt U-värdesmetoden, parallellt med värmeflödesriktningen.

Resultaten av U-värdesmetoden och λ-värdesmetoden ger olika resultat eftersom metoderna beräknas olika. Metoderna representerar ett undre och övre gränsvärde för värmemotståndet jämfört det verkliga studerade fallet. I rapporten används ett medelvärde för dessa två metoderna i handberäkningarna samt sammansatta materialskikt i 2D (Peterson, 2013).

4.2 Analys i COMSOL Multiphysics®

COMSOL Multiphysics® är ett program som är uppbyggt på finita elementmetoden. Finita elementmetoden beskrivs vidare i kapitel 4.2.3. Programmet kan användas för många typer av simuleringar och beräkningar via olika typer av plugin, bland annat för elektronik, kemiska tillämpningar och mekanik (COMSOL Inc, 2017). Heat transfer in solids bygger på fysik från Fouriers lag och är det plugin som beskriver värmetransmission genom solida material, vilket används i detta arbete. COMSOL® skapar element, drivkrafter, och materialparmetrar från indata av användaren, detta gör programmet förhållandevis enkelt att använda. (Wingård, 2009).

4.2.1 Tillvägagångssätt för att ta fram köldbryggor

För att beräkna köldbryggornas storlek så modelleras två fall, ett fall som är likt verkligheten och ett referensfall utan köldbrygga. För referensfallet har köldbryggan uteslutits och modellen har avgränsats med vinkelräta linjer mot byggnadsdelarna. Skillnaden på dessa kommer ge köldbryggans värmegenomgångskoefficient Ψ och χ.

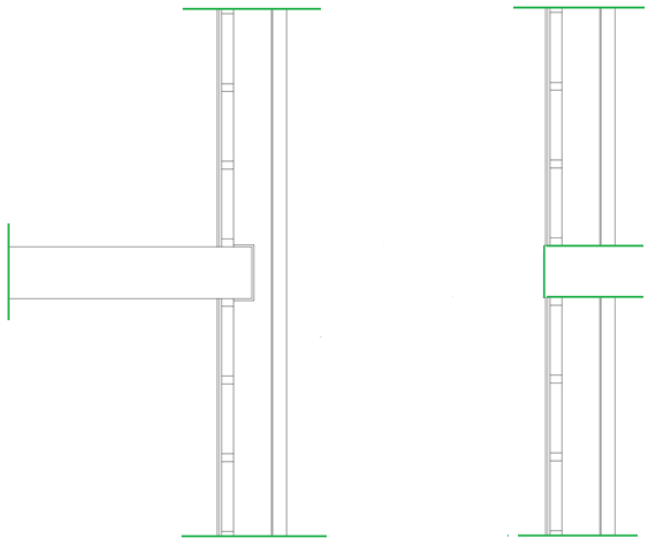
Beroende på köldbryggans utseende och förekomst redovisas resultaten olika. Linjära köldbryggor redovisas i W/mK. Punktköldbryggor redovisas i W/K. Ekvationerna för Ψ och χ beskrivs nedan (Peterson, 2013).

- Linjeköldbryggor (2D)

$$\Psi_{Linjeköldbrygga} = q_{beräkningsmodell} - q_{referensfall} \quad [\mathrm{W/mK}] \qquad \text{(Ekv. 6)}$$

- Punktköldbryggor (3D)

$$\chi_{Linjeköldbrygga} = q_{beräkningsmodell} - q_{referensfall} \quad [\mathrm{W/K}] \qquad \text{(Ekv. 7)}$$



Figur 8. Köldbrygga mellanbjälklag, verkligt fall och motsvarande referensfall.

I Figur 8 illustreras hur köldbryggan för mellanbjälklag tas fram genom att subtrahera referensfallet till höger från det verkliga fallet till vänster enligt (Ekv. 6). Vid 3D anslutningar används (Ekv. 7). De gröna linjerna motsvarar adiabatiska gränser.

Resultatet av linjeköldbryggorna skall multipliceras med längden av dess förekomst och sedan adderas på genomsnittliga värmegenomgångskoefficienten, U_m.
Vid en komplett utvärdering av köldbryggor skall resultatet från punktköldbryggor multipliceras med antal förekomster i byggnaden för att sedan adderas till beräkningen för den genomsnittliga värmegenomgångskoefficienten, U_m på samma sätt som för linjeköldbryggorna.

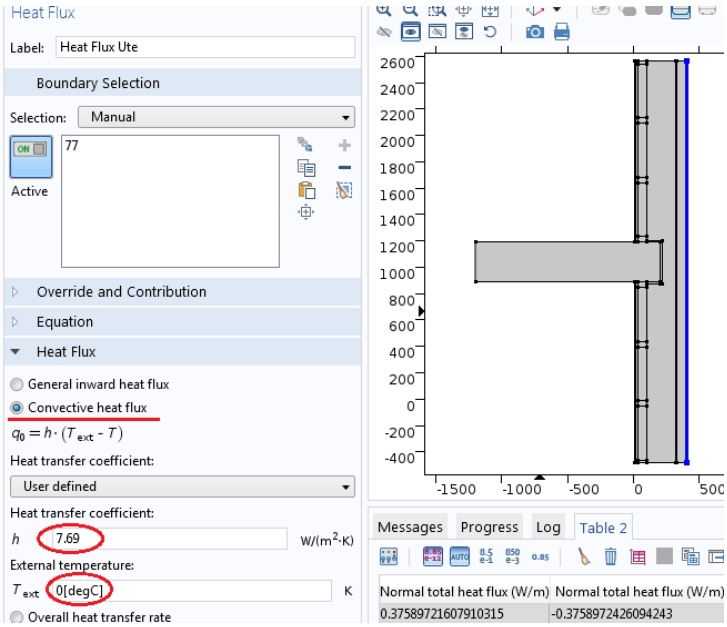
4.2.2 Uppbyggnad av beräkningsmodell och randvillkor

För att utföra en värmetransmissionsanalys i COMSOL® behövs en geometri att undersöka. Modeller går att designa och rita direkt i COMSOLs® grafikfönster genom att ange parametrar och koordinater för geometrierna för både 2D- och 3D-geometrier. Författarna har valt modellera köldbryggorna i ett CAD-program för att sedan importera modeller till COMSOL®. Ritningsprogrammet som använts är AutoCad Autodesk™.

Vid analys av värmetransmission behöver användaren ta ställning till om beräkningarna ska utföras med stationära randvillkor eller tidsberoende randvillkor. Med stationära randvillkor avses förhållanden som är stabila och konstanta genom hela analysen. I denna studie har författarna valt att hålla temperaturen utomhus och inomhus konstant, vilket

motsvarar stationära randvillkor. Detta eftersom studien fokuserar på skillnaden i värmetransmission för valda köldbryggor kontra ett referensfall. Eftersom arbetet använder stationära tillstånd för värmetransmission behöver materialen i modellen enbart tillges ett λ-värde för de olika soliderna. De materialparametrar som använts finns beskrivna i kapitel 3.2.3.

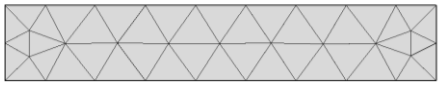
Under fliken Heat transfer in solids i COMSOL® sätts parametrar för värmens drivkraft. På ytorna som är i kontakt med uteklimat och inneklimat skall en drivkraft appliceras, vilket i detta fall är temperaturdifferensen mellan ytorna. Beräkningarna utförs med en temperaturskillnad på en grad mellan ytorna. Uteklimatet är 0 grader Celsius utomhus och inneklimatet är 1 grad Celsius inomhus. På så sätt fås ett resultat stående i proportion mot temperaturdifferensen. Genom verktyget Heat flux ska ett övergångsmotstånd hos ytorna inkluderas. Där används Convective heat flux där Heat transfer coefficient, h, skall anges. Dessa värden finns tabellerade i Tabell 1. I Figur 9 visas hur drivkraften appliceras i COMSOL®.



Figur 9. En drivkraft appliceras genom funktionen Heat flux i COMSOL®.

4.2.3 Numeriska beräkningar

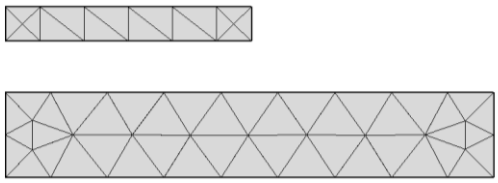
Finita elementmetoden är en numerisk metod för att hitta approximativa lösningar till partiella differentialekvationer. Metoden bygger på att en geometri delas upp i flera mindre element, så kallade finita element. Exempelvis trianglar och rektanglar vid tvådimensionella beräkningar, prismor vid tredimensionella. I elementens hörn skapas nodpunkter. Dessa nodpunkter beskriver tillsammans den uppritade geometrin genom ett rutnät, mesh, som visas i Figur 10. Beräkningarna kan lösas iterativt eller direkt. Mindre och finare elementindelning ger noggrannare resultat (Nilsson, 2016).



Figur 10. Geometri indelad i finita element med noder i elementens knutpunkter.

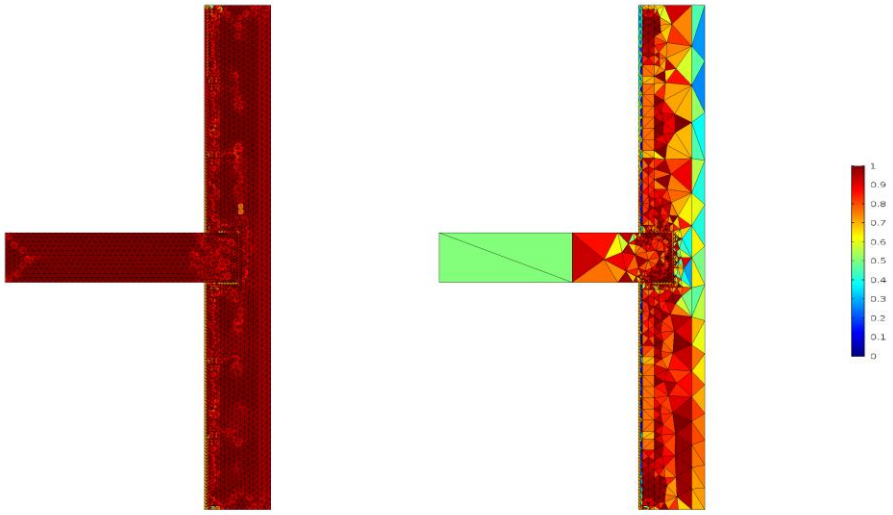
4.2.4 Kvalité på elementindelning – Mesh independence

I COMSOL® kan storleken på största och minsta element med mera bestämmas, detta leder till olika noggrannhet i beräkningarna. I COMSOL® finns nio standardelementindelningar, från Extremely coarse till Extremely fine, ju finare mesh desto fler element skapas vilket leder till större beräkningar. Elementstorleken på de minsta elementet bör max uppgå till halva storleken för minsta geometrin i modellen. Detta på grund av att tillförlitligheten i resultatet minskar då COMSOL® inte kan ta hänsyn till geometrier som är mindre än elementstorleken på ett korrekt sätt. Detta fenomen illustreras i Figur 11. På den undre geometrin får två element plats på höjden medan det bara får plats ett element på den övre. Den undre geometrin ger alltså ett mer tillförlitligt resultat. För den övre geometrin krävs en mer finfördelad mesh för att få samma pålitliga resultat.



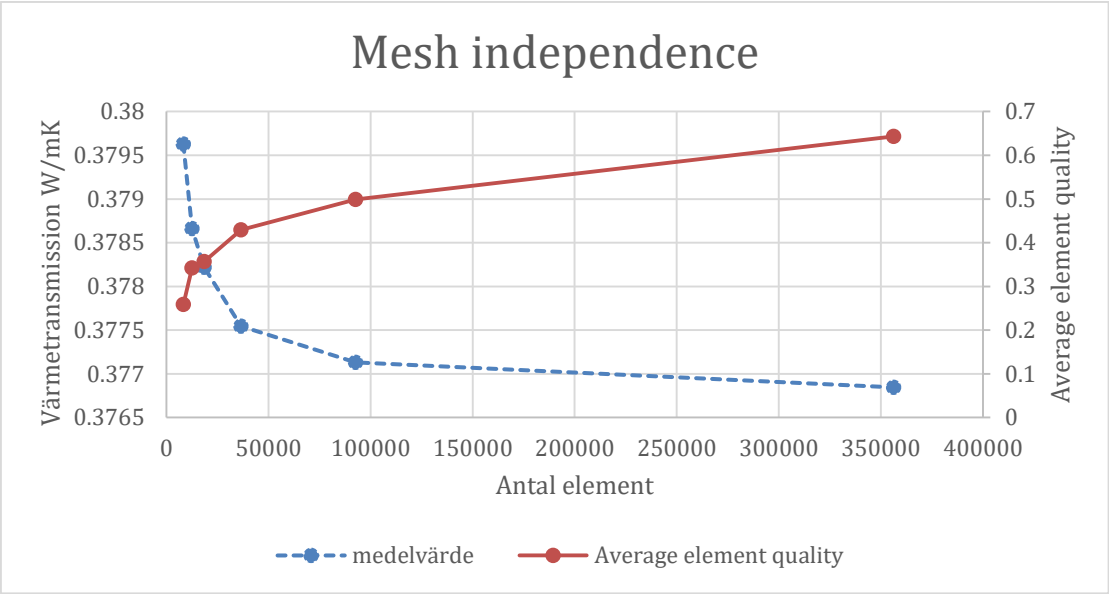
Figur 11. Bild som visar elementstorleken på två geometrier med meshkvalité.

För att få ett säkerställt resultat eftersträvas en mesh bestående av jämnstora element. Detta leder till att elementens sidor blir liksidiga. I COMSOL® finns en funktion som plottar fördelningen av elementkvalité vilket visas i Figur 12. Figuren visar elementens kvalité med hänsyn till liksidighet genom färger. En modell med liksidiga element blir färgade med enhetlig färg medan en modell av oregelbundna elementstorlekar får olika färg.



Figur 12. Till vänster finfördelad mesh, 4 724 element, till höger mindre finfördelad mesh, 1 227 element.

För att kontrollera resultatens pålitlighet ytterligare kommer författarna studera statistik över meshens kvalité i form av Average element quality från COMSOL®. Under statistik över meshens kvalité visas fördelningen av elementens liksidighet, Average element quality. En hög medelkvalitetsnivå är önskvärt för elementen. Utifrån Average element quality har antal element kontrollerats samt värmetransmission genom konstruktionen, en studie har gjorts för varje modell för att kontrollera Mesh oberoende. I Figur 13 nedan ett diagram för mesh independence.

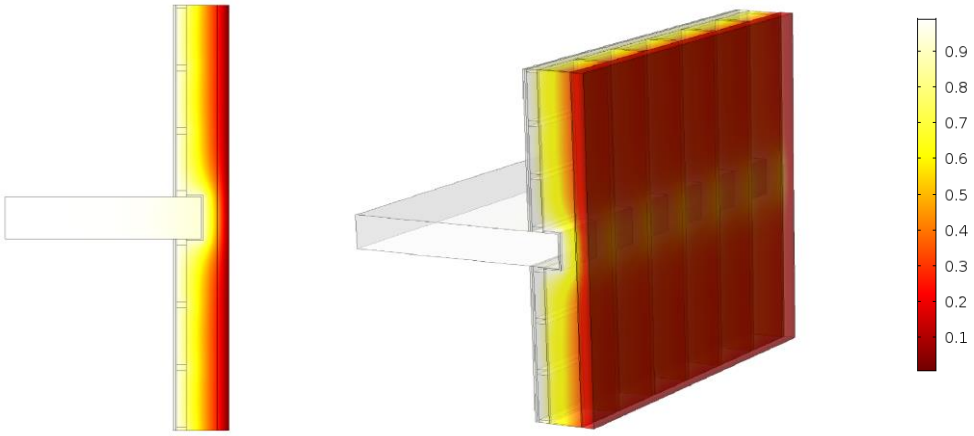


Figur 13. Diagram för mesh independence för olika elementstorlekar för en specifik modell. Den röda kurvan visar elementens medelkvalité och den blåstreckade visar värmetansmission genom modellen.

Antalet element, kvalitén på elementen samt värmetransmission genom konstruktionsdelen visas för olika mesh-inställningar. Genom att kurvan för medelkvalité på elementen och kurvan för värmetransmission går mot att bli horisontella innebär det att modellen är oberoende av meshindelningen, d.v.s. mesh independent. Resultatet för värmetransmission bör inte förändras allt för mycket i detta läge om elementen skulle bli blir fler.

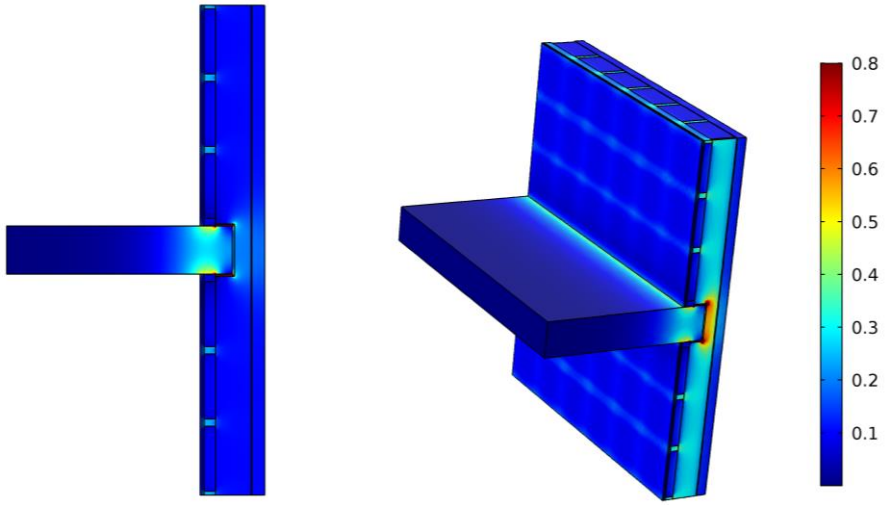
4.2.5 Resultat av analys/Study

Efter att indata är given kan en analys göras via kommandot Study. Användaren väljer själv vilket resultat som skall tas fram och hur det skall presenteras. Det finns flera olika varianter av plot-funktioner beroende på vad som ska studeras. Författarna har valt att studera temperaturfördelningen samt Total heat flux magnitude i 2D och 3D över ytorna för att kontrollera att inga uppenbara beräkningsfel uppkommit. Exempel på temperaturfördelningen visas i Figur 14. Vit färg är varmare temperatur, röd är kallare, färgskalan har sitt ursprung från symboliken med smält järn. Temperaturskalan varierar mellan noll och en grad Celsius.



Figur 14. Bild över temperaturfördelning hos en korslagd regelvägg. Vit färg är varmare temperatur, röd är kallare.

I resultatet kommer temperaturfördelningen för 2D modellerna att redovisas på motsvarande sätt som i Figur 14. Författarna har valt att redovisa Total heat flux magnitude för att tydligare visa upp de tredimensionella effekterna som uppstår vid modellering i 3D jämfört med 2D. Total Heat flux magnitude beskriver transporterad effekt per ytenhet. Total heat flux magnitude beskrivs [W/m^{2}K]. Exempel på detta visas i Figur 15.



Figur 15. Värmetransmission per ytenhet genom funktionen Total heat flux magnitude [W/m^{2}K].

Beräkningarna utförs genom att simulera den totala värmetransmissionen genom byggnadsdelen. Det finns flera sätt att ta fram detta, ”Normal total heat flux” anses vara det mest korrekta sättet då värmetransmission kan beskrivas som vinkelrätt transmission ut genom ytorna.

Resultat för värmetransmission från olika mesh-noggrannheter sammanställs sedan i ett Excellark som bifogas genom diagram i bilaga 1.1. Samma metod genomförs för både 2D och 3D i olika Excelblad. Vidare kan köldbryggorna beräknas i Excel genom att subtrahera resultatet av referensfallet från det verkliga fallet med köldbryggan i respektive 2D och 3D.

Slutligen jämförs resultaten med varandra för att analysera skillnaderna i beräkningsmetoderna. Resultatet redovisas i W/mK för linjeköldbryggor och W/K för punktköldbryggor.

4.3 Beräkning av värmetransmission genom platta på mark, kantbalk och mark

Värmetransmissionen och köldbryggan som uppstår vid platta på mark, kantbalk och mark behöver utredas med en annan metod än övriga köldbryggor. Metoderna som används i beräkningarna redovisas under detta delkapitel.

4.3.1 Metod vid numerisk analys

Marken kan ge en isolerande effekt några år efter nybyggnation. Förutsättningarna för modellen har kontrolleras mot en tidsberoende studie, som visar hur stor del av marken som bidrar till isolering. Denna kontroll har utförts genom en metod som presenteras i

examensarbetet *Thermal bridges at foundations - Evaluation of heat calculation methods* (Nyberg, 2011). Storleken på beräkningsmodellens markdjup skall vara semi-infinit. Semi-infinit betyder att djupet är tillräckligt stort så att temperaturen hålls konstant längst ner i modellen och inte påverkas nämnvärt av värmetransmission från den studerade byggnaden oavsett variation i utomhustemperatur. Enligt (Nyberg, 2011) kan detta avstånd anses vara 2,5*B´, B´ beskrivs enligt (Ekv. 8), där b beskriver plattans bredd och c beskriver plattans längd.

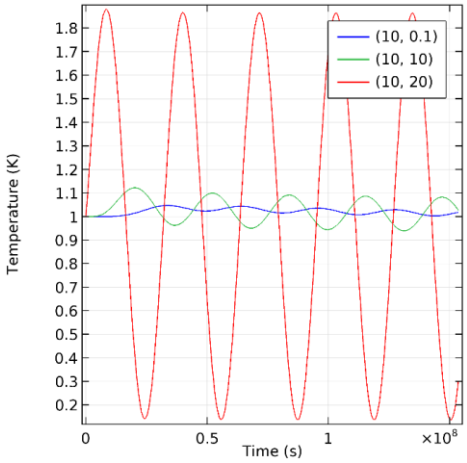
$$B' = \frac{b * c}{b + c}$$ Formel för rekommenderat referensmått på byggnad [m] (Ekv. 8)

Vidare begränsas plattans storlek i modellen av 0.5*B´. Markens storlek beskrivs som 2,5*B´ i horisontell och vertikal riktning från byggnaden. Då modellens storlek är bestämd kan kantbalken beräknas som stationär.

4.3.2 Storlek på beräkningsmodell vid numerisk analys

Plattans bredd b, är given 10 m och längden c, 13.33 m. Detta ger B´ = 8 m. Marken har antagits bestå av berg med ett λ-värde på 3.5 W/mK.

2,5 B´ är 20 meter, modellen som kontrolleras har därför modellerats med denna storlek, med givna materialparameterar visar analysen att storleken är tillräcklig. I Figur 16 redovisas temperatursvängningar under 5 år. Marken kan anses semi-infinit.



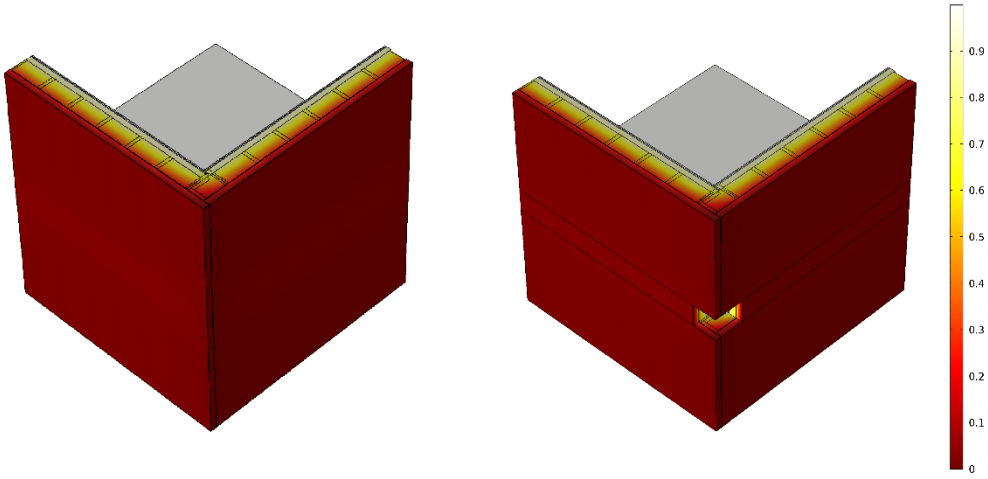
Figur 16. Temperatursvängningar över tid på olika nivåer i marken, där röd är vid ytan, grön vid 10 meters djup, blå vid 20 meters djup.

4.3.3 Handberäkning i mark

För beräkning av värmemotstånd i mark har (Swedish Standard Institute, ISO SS-EN ISO 13370:2007) används. I standarden beskrivs hur värmetransport sker via marken och hur det kan beräknas. U-värde för mark och golv tas fram genom beräkningsmetoder beskrivna i kapitel 8 och 9 (Swedish Standard Institute, ISO SS-EN ISO 13370:2007). Beräkningarna beror på en rad parametrar bland annat storleken på plattan, värmemotstånd för plattan och värmeledningsförmåga hos mark.

4.4 Beräkning av punktköldbrygga

Vid beräkning av linjeköldbryggor uppstår hörnpunkter som inte blir analyserade. Dessa punkter saknar på yta mot uppvärmd inneluft och kan enbart beaktas korrekt via 3D beräkning. För en komplett beräkning av värmetransmission av en byggnad skall punktköldbryggor utvärderas. Punktköldbryggor tas fram genom (Ekv. 7). Genom att beräkna skillnaden mellan en verkligt uppritad geometri och ett referensfall bestående av linjeköldbryggor med längden för ytor mot uppvärmd inneluft. Hörnet som återstår i modellen är alltså punktköldbryggan. Punktköldbryggor beskrivs [W/K] . 3D modeller är svåra att visualisera och redovisa på ett överskådligt sätt, därför redovisas endast en avbildning över modellen i 3D, se Figur 17.



Figur 17. Redovisning av punktköldbrygga, verklig geometri till vänster, referensfall till höger.

5 Resultat

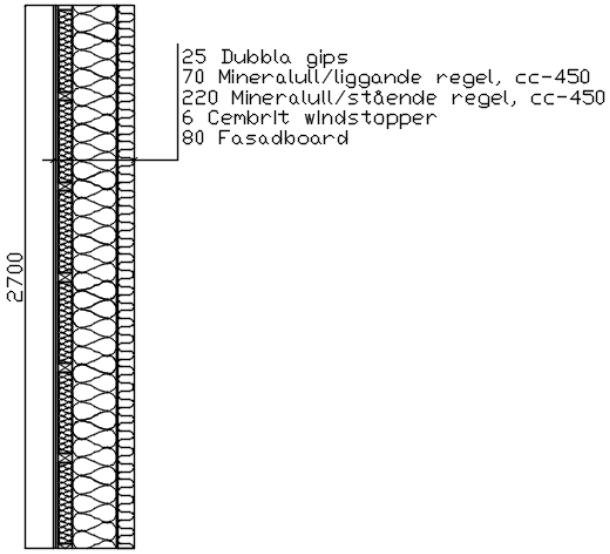
Kapitel 5 redovisar resultaten av utförda beräkningar. Ritningar och beräkningsmodeller från COMSOL® redovisas för att ge läsaren insyn i modellernas uppbyggnad. Sammanställning av resultat från de olika beräkningsmetoderna redovisas i tabell för de olika delkapitlen.

5.1 Jämförelse av U-värde mellan beräkningsmetoderna

För att kunna jämföra köldbryggor i klimatskärmen behövs några typer av antaganden mellan beräkningsmetoderna. Det här delkapitlet berör skillnader som uppkommer av sammansatta materialskikt i konstruktioner, dvs. regelskikt. Regelskikten modelleras olika för respektive beräkningsmetod. Antaganden som gjorts i denna studie baseras på handräkningarnas begränsningar, se kapitel 4.1. Sammanvägningen av sammansatta materialskikt fungerar på liknande sätt för handberäkning och 2D analys. Konstruktionens geometri förenklas alltså genom att tillge de sammansatta skikten ett gemensamt λ–värde. Denna typ av förenklingar ligger till grund för skillnader i resultat mellan beräkningsmetoderna. Se kapitel 3.2.4 för antaganden om modellernas avgränsning med kontroll genom Arrow surface i COMSOL®. 3D modellerna är också modellerade med dessa avgränsningar.

5.1.1 Yttervägg med korslagda regelskikt

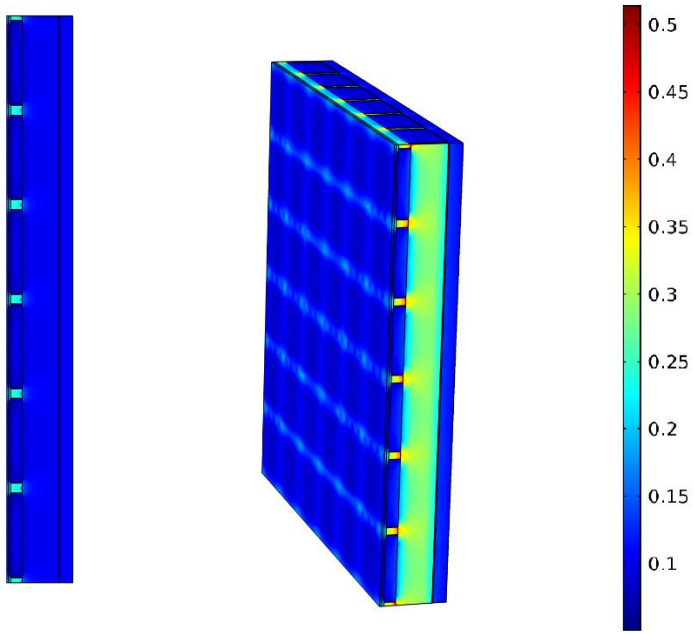
Väggens geometri i denna modell består av sex stycken centrumavstånd för regelväggen där de yttre reglarna i varje ände har delats på mitten. Detta för att kunna jämföra resultatet av handberäkningen med 2D och 3D. Denna avgränsning beror även på att värmetransmissionen i mitten av regeln sker vinkelrätt byggnadsdelen, se kapitel 3.2.4.



Figur 18. Ritning av träregelvägg för jämförelse av U-värden.

Materialskiktet Mineralull/stående reglar har i modelleringarna för 2D och handberäkningar ett sammanvägt λ–värde på 0,0437 W/mK, vilket betyder att skiktet anses vara homogent och kontinuerligt genom analysen. Detta skikt har beräknats fram i handberäkningar för yttervägg visas i bilaga handberäkningar. Ett nytt materialskikt har skapats med hänsyn till andelen mineralull och träreglar. För 3D-modellen är de korslagda reglarna modellerade som det ser ut i verkligheten. I Figur 19 visas transporterad effekt

värme per ytenhet genom Total heat flux magnitude. Skillnader i 2D fallet och 3D fallet beror på de tredimensionella effekterna som uppkommer med korslagda reglar.



Figur 19. Total heat flux magnitude [W/m²K] för regelvägg i 2D och 3D.

De tredimensionella effekterna uppkommer vid möten mellan byggnadsdelarna. Möten mellan reglar och reglarna var för sig blir i detta fall tydliga köldbryggor i klimatskärmen. Notera att 3D-modellen är avkortad mitt i reglarna vilket syns extra tydligt för den stående träregeln längst ut i pappret i Figur 19. Skillnaderna i U-värde jämförs med 3D modellen som anses vara mest korrekt med hänsyn till U-värde.

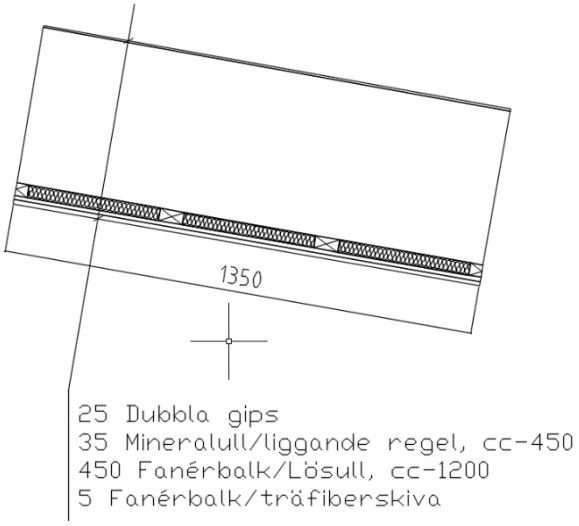
Tabell 4. Jämförelse av U-värde för vägg mellan olika beräkningsmetoder.

Vägg	3D	2D	Handberäkning
U-värde för regelvägg [W/m²K]	0,1013	0,1040	0,10000
Skillnad i % för U-värdesberäkning jämfört med 3D		2,66 %	-1,34 %

U-värdet är lägre i 3D beräkningarna än 2D. Detta härleds till att skiktet av de vertikala reglarna/mineralull i 2D beräkningen sammanvägs och ger en högre värmeledningsförmåga. Att handberäkningarna skiljer 4 % mot 2D kan härledas till att värmeflödet endast tillåts att transmitteras i 1 dimension för handberäkningarna, medan värmeflödet i 2D kan transmitteras fritt åt alla riktningar i två dimensioner. Detta påverkar också skillnaden i resultat mellan 2D och 3D eftersom 3D-modellen kan transmittera värme åt alla riktningar i tre dimensioner vid mötet mellan de korslagda skikten.

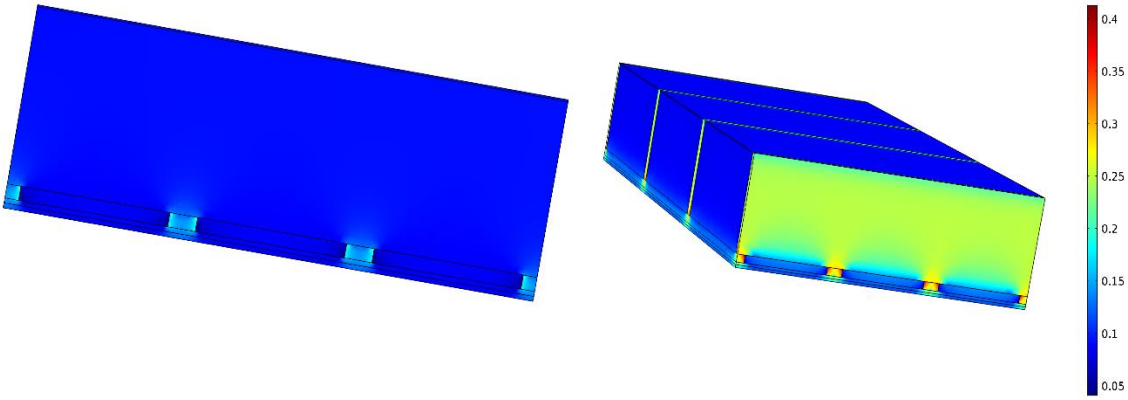
5.1.2 Takkonstruktion med fanérbalk

Takets geometri i denna modell består av tre stycken centrumavstånd för regelväggen där de yttre reglarna i varje ände har delats på mitten. Detta för att kunna jämföra resultatet av handberäkningen med 2D och 3D. Denna avgränsning beror även på att värmetransmissionen i mitten av regeln sker vinkelrätt konstruktionsdelen, se kapitel 3.2.4.



Figur 20. Ritning av tak för jämförelse av U-värden.

Materialskiktet Fanérbalk/lösull har i modelleringarna för 2D och handberäkningar ett sammanvägt λ–värde på 0,0464 W/mK. Fanérbalken/träfiberskivan har ett sammanvägt λ–värde på 0,1384 W/mK. Vilket betyder att dessa skikt anses vara homogena och kontinuerliga genom analysen. Skiktens sammanvägda λ–värde har beräknats fram i handberäkningar för tak enligt bilaga handberäkningar. Fanérbalkarnas geometri och placering har därmed inkluderats tillsammans med mängden isolering när det nya materialskiktet har skapats. För 3D-modellerna ser balkarna ut som i verkligheten. I Figur 19 visas transporterad effekt värme per ytenhet genom Total heat flux magnitude.



Figur 21. Total heat flux magnitude [W/m²K] för tak i 2D och 3D.

Skillnader i 2D fallet och 3D fallet beror på de tredimensionella effekterna som uppkommer med fanérbalkarna eftersom dessa transmitterar värme bättre än lösullen. Fanérbalkarna blir i detta fall tydliga köldbryggor i klimatskärmen. Notera att 3D-modellen är avkortad mitt i balkarna, därav den ljusa färgen för fanérbalken längst ut i pappret i Figur 21. Skillnaderna i U-värde jämförs med 3D modellen som anses vara mest korrekt med hänsyn till U-värde.

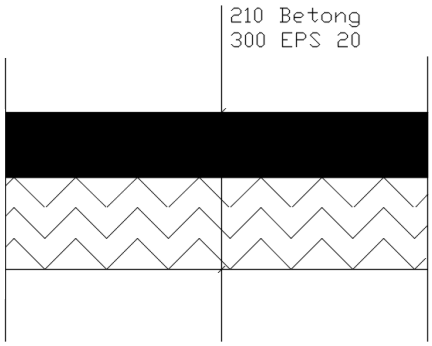
Tabell 5. Jämförelse av U-värde för tak mellan olika beräkningsmetoder.

Tak	3D	2D	Handberäkning
U-värde för regelvägg [W/m²K]	0,09146	0,0920	0,0952
Skillnad i % för U-värdesberäkning jämfört med 3D		0,59 %	4,13 %

Effekterna från det sammansatta skiktet för fanerbalkar/mineralull beaktas i 3D vilket ger en bättre isolerande förmåga än för 2D och handberäkningar. Att handberäkningarna beräknas till ett högre U-värde än både 2D och 3D kan härledas till att värmeflödet endast tillåts att transmitteras i 1 dimension för handberäkningarna. För 2D kan värmeflödet transmitteras fritt åt alla riktningar i två dimensioner. Detta påverkar också skillnaden i resultat mellan 2D och 3D eftersom 3D-modellen kan transmittera värme åt alla riktningar i tre dimensioner.

5.1.3 Golv av typ ”platta på mark”

Då plattan endast består av homogena materialskikt blir skillnaden mellan 2D och 3D obetydlig. Därför redovisas inte Total heat flux magnitude för golv. Skillnaden som uppkommer kan antas vara beräkningsfel från meshen i COMSOL®. Att handberäkningar skiljer sig mycket åt för beräkningarna av 3D kan härledas till att de är uträknade med skilda metoder. Datoranalysen bygger på att en stor kontrollerad yta analyseras. Vid handberäkning används förbestämda värden. I Figur 22 visas ritningen av ett tvärsnitt av golvet.



Figur 22. Ritning över golv, enligt modell "platta på mark". Jämförelse av U-värden.

I Tabell 6 redovisas resultatet från analysen av Golv.

Tabell 6. Resultat av referensfallsberäkningar på golv.

Golv	3D	2D	Handberäkning
U-värde för platta och mark [W/m²K]	0.0835	0.08350	0.1066
Skillnad i % för U-värdesberäkning jämfört med 3D		-0.03 %	27.62 %

Att skillnaden är så stor i handberäkningsfallet härleder författarna till att det finns stora skillnader i beräkningsmetoderna för numerisk analys och den förenklade handberäkningen. Det är svårt att göra korrekta antaganden på ett enkelt sätt för marken.

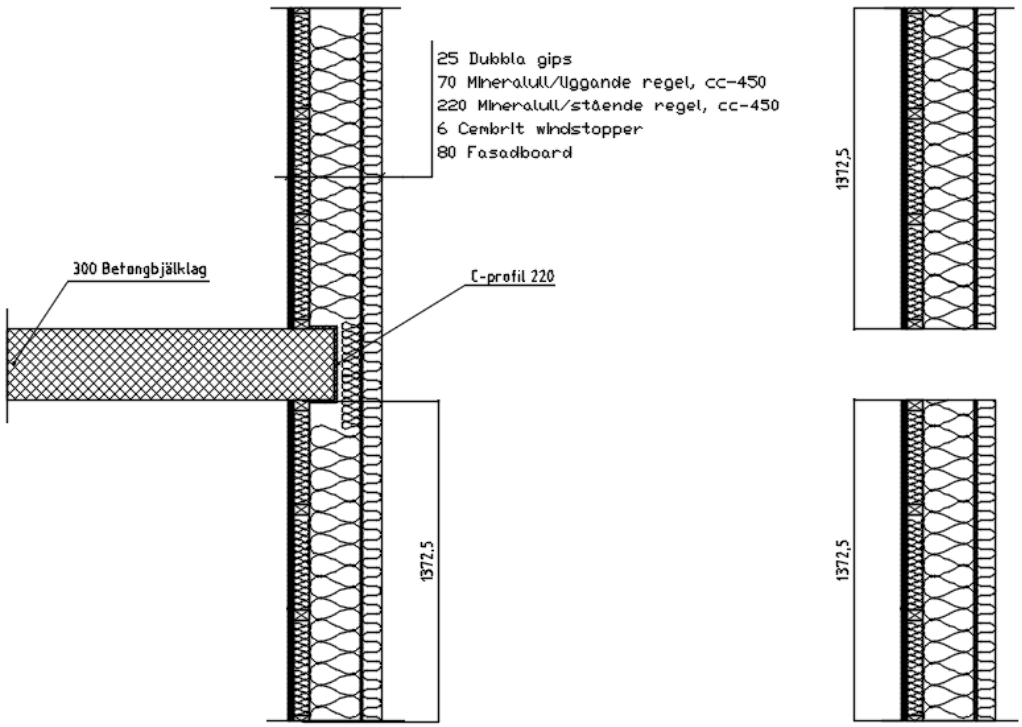
5.2 Byggnadsdelar med köldbryggor

Här redovisas konstruktionsdetaljer som baseras på byggnadsdelar redovisade i kapitel 5.1, med påverkan från köldbrygga. Då byggnadsdelarna återkommer i flera analyserade modeller har författarna valt att redovisa skillnader och metod en gång för Mellanbjälklag möter yttervägg för att sedan enbart redovisa ritning med referensfall, figur över temperaturfördelning för att illustrera köldbrygga och två figurer med Total Heat flux magnitude för att visa på skillnader i vad som beaktas vid modellering i 2D respektive 3D. Temperaturfördelning och Total heat flux magnitude hos referensfall i 2D och 3D redovisas som bilaga.

5.2.1 Mellanbjälklag möter yttervägg

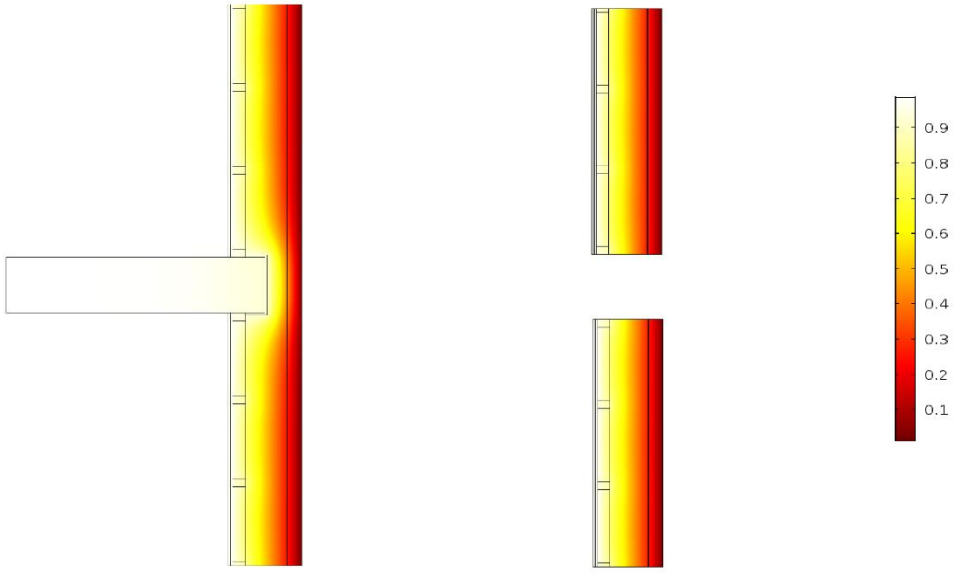
Här redovisas köldbryggan som uppstår mellan bjälklag och yttervägg. Avståndet mellan reglarna vid bjälklaget har anpassats så att bjälklaget får plats däremellan, detta har antagits för att kunna jämföra bjälklag med referensfall och för att värmeflödena ska vara symmetriskt utformade.

Referensfallet till mellanbjälklaget möter yttervägg består av en regelvägg med samma centrumavstånd som verkliga fallet. Den övre delen av väggen har modellerats en gång och sedan spegelvänts för att motsvara ett referensfall för hela regelväggen då geometrin är anpassad för att vara identisk ovanför och under bjälklaget.



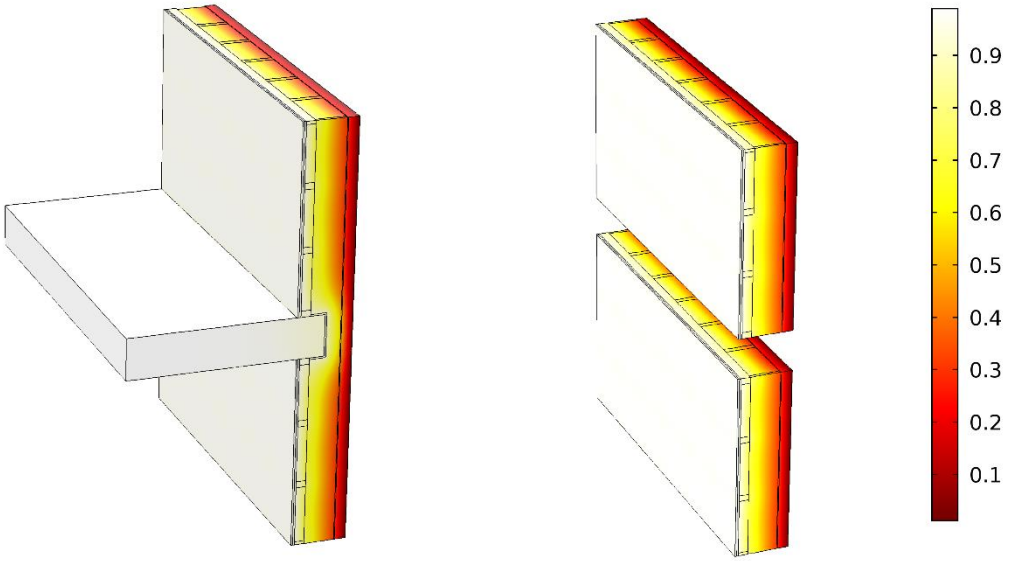
Figur 23. Ritning av mellanbjälklag möter yttervägg och referensfall.

Nedan i Figur 24 visas temperaturfördelningen av verkligt fall till vänster och referensfall till höger i 2D för modellen av mellanbjälklag möter yttervägg. Förändringarna i byggnadsdelen gör att temperaturnivåkurvorna förflyttas längre ut i konstruktionen mot utsida vägg. Här uppstår en tydlig köldbrygga. Värmen transmitterar mer genom bjälklaget än motsvarande regelvägg.



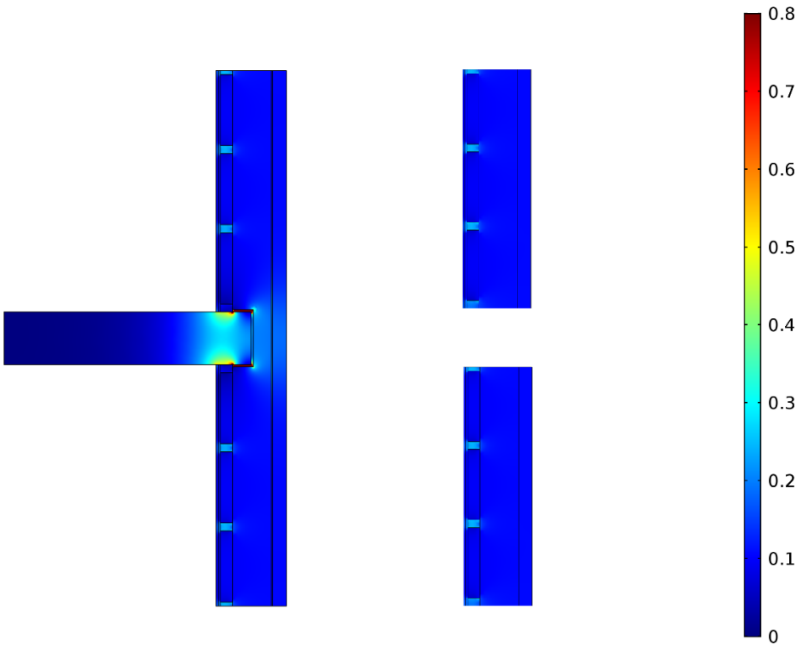
Figur 24. Temperaturfördelning i Celsius av mellanbjälklag möter yttervägg i 2D kontra referensfall.

Temperaturfördelningen i Figur 25 ser liknande ut även för 3D-modellen. Detta påverkar inte förståelsen för modellen och redovisas hädanefter endast i bilaga.



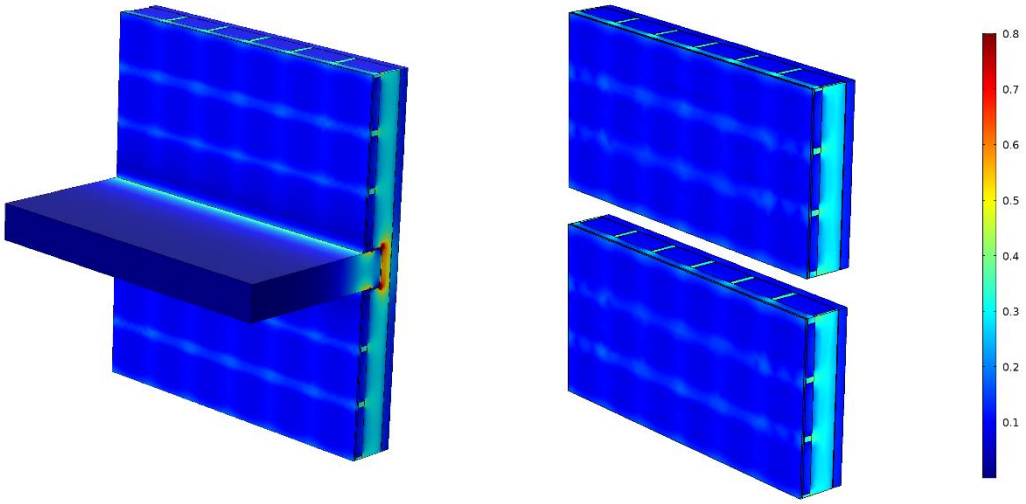
Figur 25. Temperaturfördelning i Celsius av mellanbjälklag möter yttervägg i 3D kontra referensfall.

I Figur 26 och Figur 27 redovisas Total heat flux magnitude vilket beskrivs i kapitel 4.2.5.



Figur 26. Total heat flux magnitude [W/m²K] för 2D mellanbjälklag möter yttervägg kontra referensfall.

Här syns effekterna av det korslagda regelskiktet i byggnadsdelen tydligt med ljusblå färg, det vill säga att mer värme transmitterar ut genom området. Den ökade värmetransmissionen för mellanbjälklaget blir tydlig när stålprofilen kommer i kontakt med träreglarna, punktköldbryggor skapas i dessa möten.



Figur 27. Total heat flux magnitude [W/m²K] för 3D mellanbjälklag möter yttervägg kontra referensfall.

Resultatet av mellanbjälklag möter yttervägg redovisas nedan i Tabell 7.

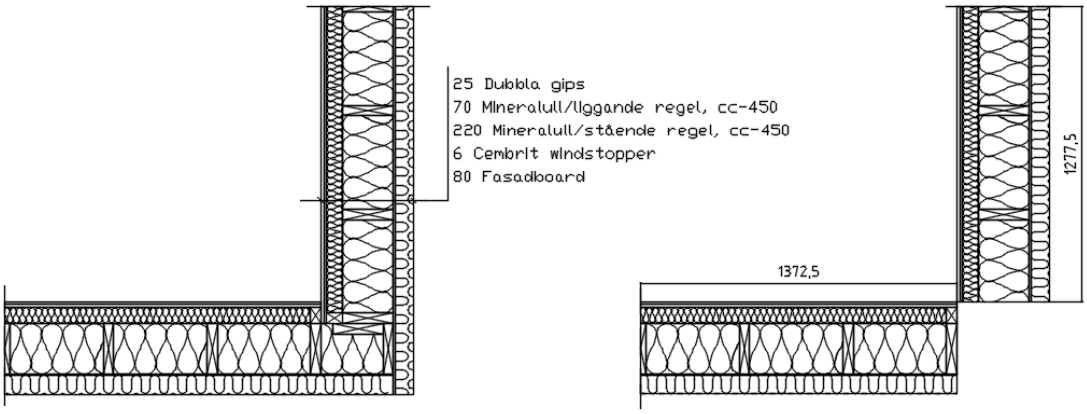
Tabell 7. Resultat av anslutning mellanbjälklag-yttervägg.

Mellanbjälklag-yttervägg	3D	2D	Handberäkning
U-värde referensfall [W/m^{2}K]	0,1017	0,1046	0,1000
Värmetransmision genom referensfall (W/mK)	0,2791	0,2871	0,2750
Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0,3536	0,3622	
Köldbrygga (W/mK)	0,0745	0,0751	
Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	21,06%	20,74%	

Den ökade värmetransmissionen genom stålprofilen leder värme ut i träreglarna. På grund av att träregeln har högre värmekonduktivitet än det sammanvägda skiktet för 2D-beräkningarna. Detta gör att felet från 2D referensfallet minskas.

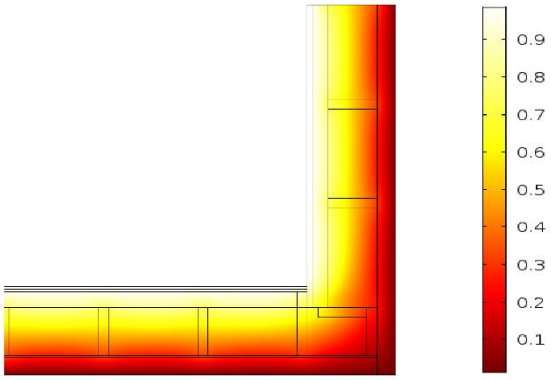
5.2.2 Ytterväggshörn

Här redovisas köldbryggan som uppstår där två ytterväggar möts. Modellen är uppbyggd av tre centrumavstånd. Referensfallet är skapat där innerväggarna möts, och anslutningen mellan byggnadsdelarna tas bort, adiabatiska gränser sätts i snittet.



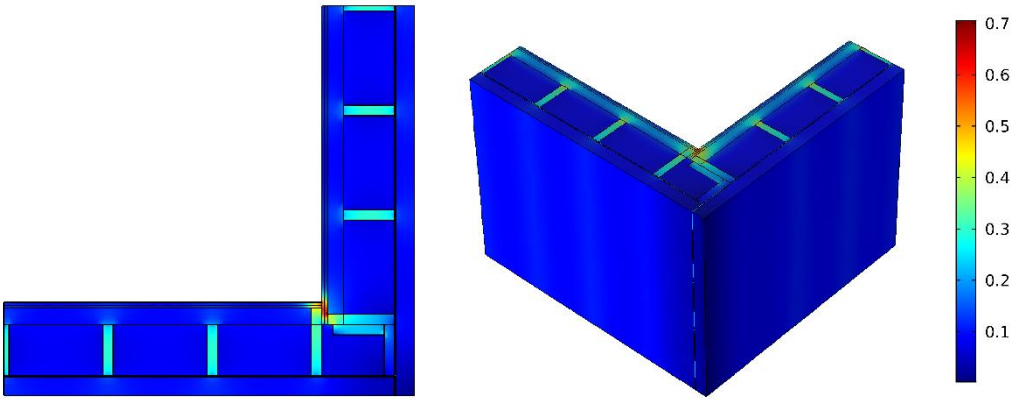
Figur 28. Ritning av ytterväggshörn och referensfall.

Nedan i Figur 29 visas temperaturfördelningen av verkligt fall för modellen. Här uppstår en väldigt tydlig köldbrygga. Det syns i modellen att hörnet blir kallare än motsvarande byggnadsdelar för insida vägg.



Figur 29. Temperaturfördelning i Celsius av 2D ytterväggshörn.

I Figur 30 redovisas Total heat flux magnitude vilket beskrivs i kapitel 4.2.5.



Figur 30. Total heat flux magnitude [W/m²K] för 2D och 3D mellanbjälklag möter yttervägg.

Resultatet av beräkningsmetoderna till köldbrygga för ytterväggshörn redovisas nedan i Tabell 8.

Tabell 8. Resultat av köldbrygga vid ytterväggshörn.

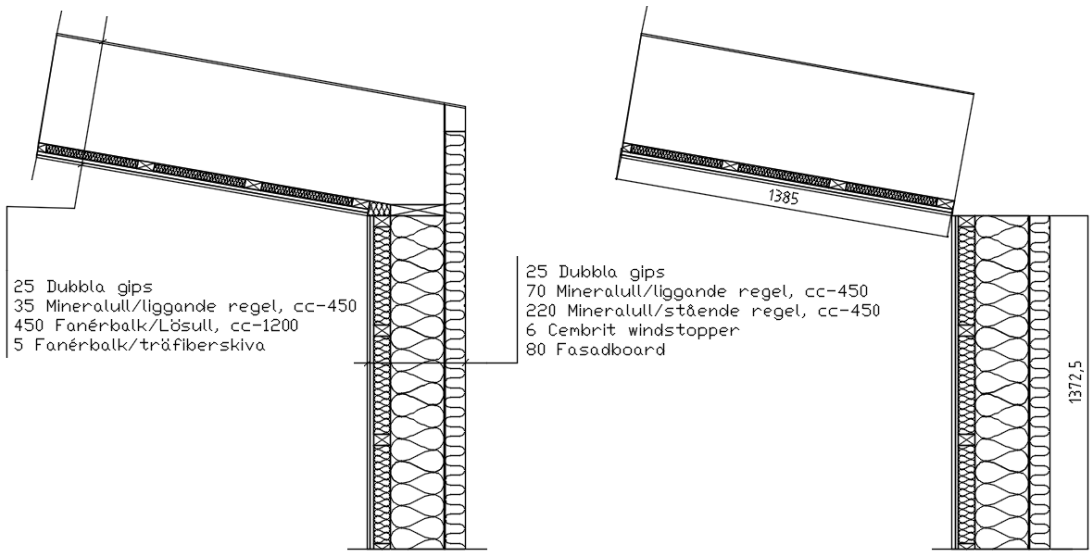
Ytterväggshörn	3D	2D	Handberäkning
U-värde referensfall [W/m^{2}K]	0.0947	0.1069	0.1000
Värmetransmision genom referensfall (W/mK)	0.2509	0.2726	0.2650
Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0.3082	0.3126	
Köldbrygga (W/mK)	0.0399	0.0400	
Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	12.93%	12.79%	

I detta fall är köldbryggans storlek lika i 2D mot 3D. Här emitterar mer energi ut genom modellen i 2D dock. En skillnad i U-värde för 2D och 3D kan dock tänkas bero på att inre horisontella regelskiktet har sammanvägts för 2D analysen och att mer värme då transmitteras genom detta material på grund av stor kontaktyta till regeln i hörnet som inte kapas bort för referensfallet. För 3D blir kontaktytan mindre till denna regel och väggen isolerar då bättre.

Referensfallet har kapats vid oregelbundet centrumavstånd för reglarna på grund av hörnets utformning. Andelen reglar blir större och andelen mineralull mindre vilket leder till att U-värdet för handberäkningarna bör avvika mer.

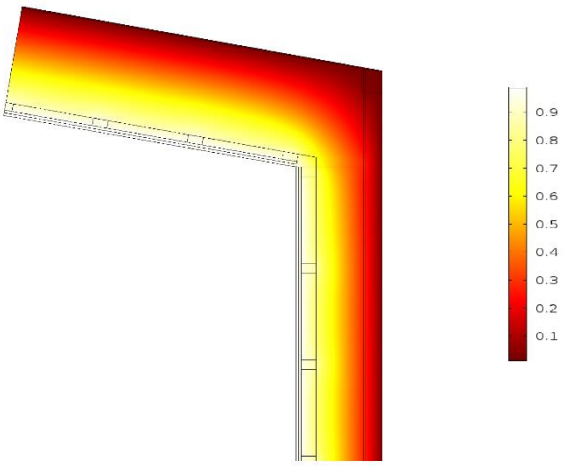
5.2.3 Takfot möter yttervägg

Här redovisas köldbryggan som uppstår mellan takfoten och ytterväggen. Väggen och taket består av tre hela centrumavstånd inklusive ett fullstort hammarband intill hörnet för både vägg och tak. Takutsprånget för takfoten har försummats i modellerna på samma sätt som fasaderna på grund av antagande om luftspalt. Se kapitel 3.2.2.



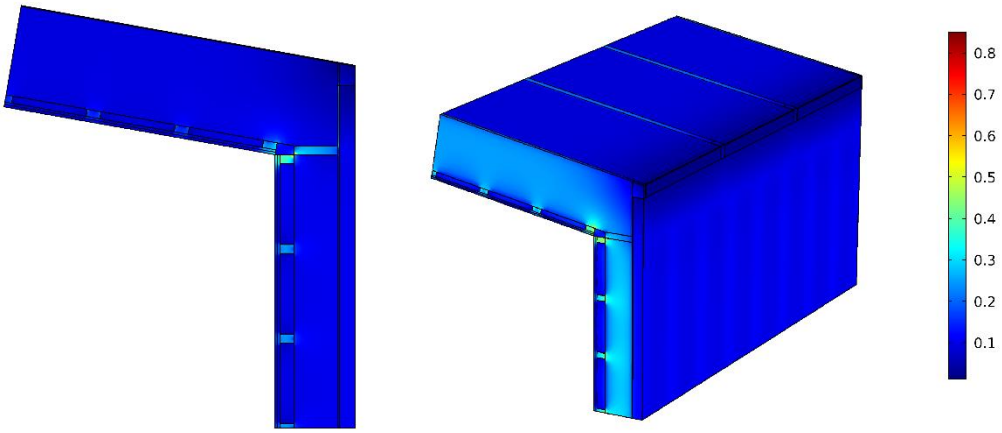
Figur 31. Ritning av takfot möter ytterväggshörn.

I Figur 32 visas temperaturfördelningen av 2D-modellen med referensfall för takfot möter yttervägg. Förändringarna i hörnanslutningen gör att temperaturnivåkurvan kryper närmare in mot insida vägg vilket gör att hörnet upplevs kallare. Det uppstår alltså en tydlig köldbrygga för hörnet.



Figur 32. Temperaturfördelning i Celsius av 2D takfot möter yttervägg.

Precis som de andra modellerna så uppkommer de tydligaste tredimensionella effekterna vid möten mellan byggnadsdelarna. Mötet mellan fanérbalk och vägg ger på samma sätt som tidigare en linjeköldbrygga i klimatskärmen. I Figur 33 visas påverkan från takfot möte yttervägg genom Total heat flux magnitude.



Figur 33. Total heat flux magnitude [W/m²K] för 2D och 3D takfot möter yttervägg.

Resultatet av beräkningsmetoderna till takfot möter ytterväggshörn redovisas nedan i Tabell 9.

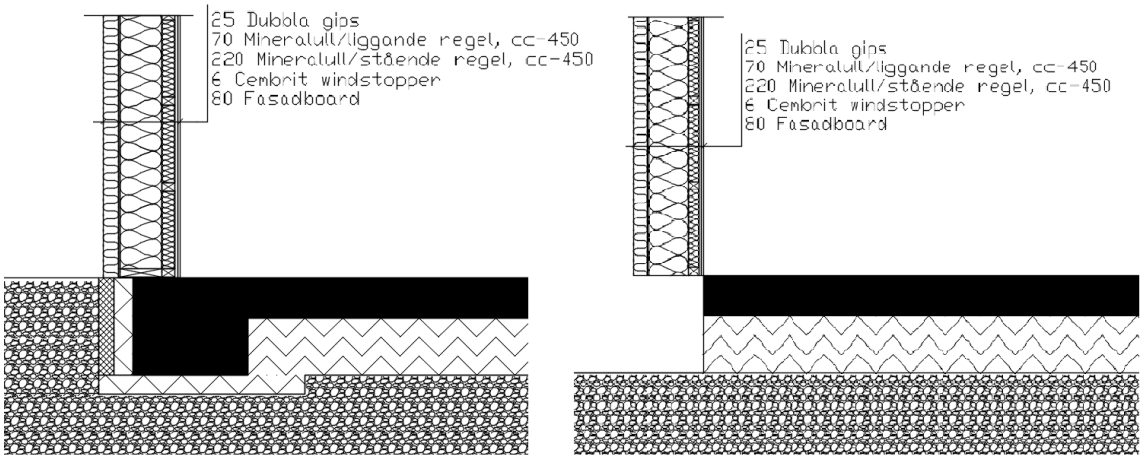
Tabell 9. Resultat av anslutning takfot möter yttervägg.

Takfot-yttervägg	3D	2D	Sammanvägd handberäkning för vägg och tak i referensfall
U-värde referensfall [W/m²K]	0.0966	0.0981	0.0976
Värmetransmision genom referensfall (W/mK)	0.2664	0.2706	0.2692
Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0.2971	0.3015	
Köldbrygga (W/mK)	0.0308	0.0309	
Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	10.36 %	10.26 %	

Skillnaden mellan 2D och 3D beräkningarna kan till stor del härledas till den korslagda regelväggen som beaktas korrekt i 3D men också fanérbalkarnas anslutning till väggen. U-värdeberäkningen har i detta fall sammanvägts med andelen yta mot uppvärmd inneluft för att få en mer korrekt jämförelse.

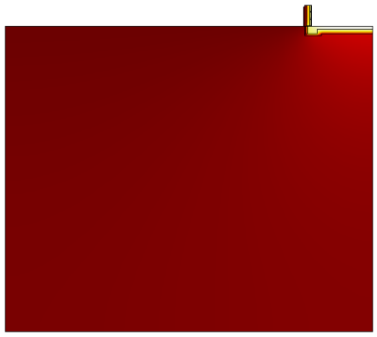
5.2.4 Kantbalk

Nedan visas en ritning över Kantbalk inklusive referensfall i Figur 34. Beräkningar för plattans dimensioner återfinns i kapitel 4.3.2.



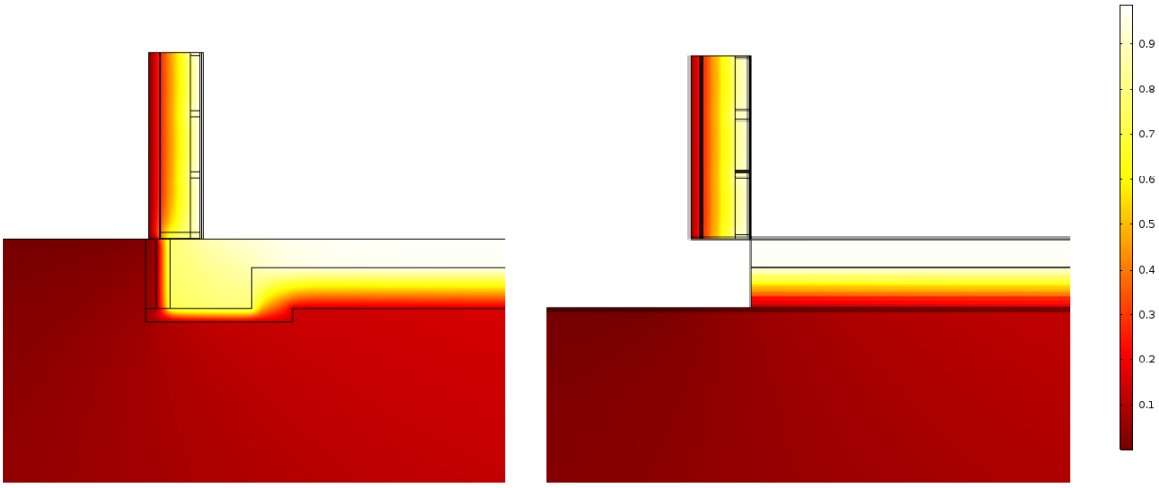
Figur 34. Ritning av kantbalk inklusive referensfall.

Marken har modellerats som 2.5 B´ vilket motsvarar 20 meter djup och 20 meter från utsida vägg i horisontell riktning. Snittet i plattan är 0.5 B´ vilket innebär fyra meter från insida vägg. Med givna materialparameterar visar analysen att storleken är tillräcklig i Figur 16. Nedan visas modellens korrekta storlek i figur Figur 35.



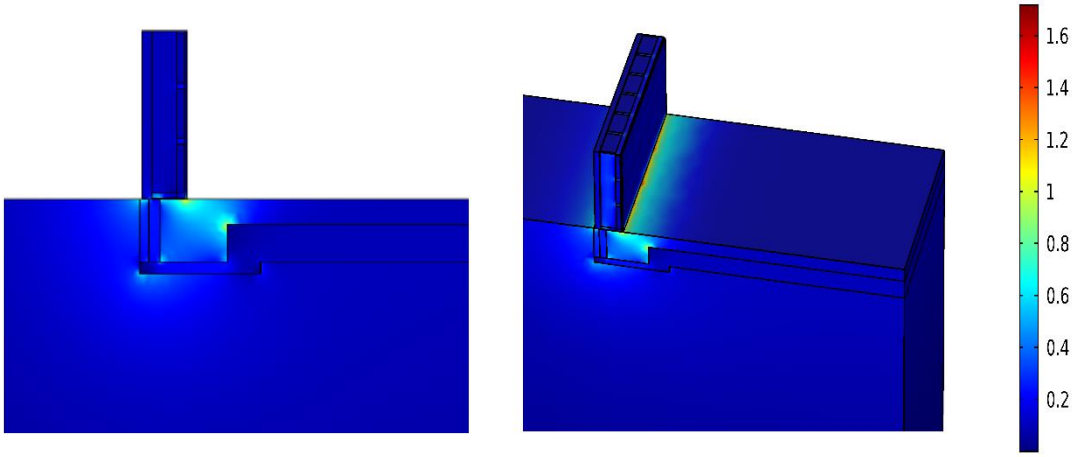
Figur 35. Storleken på modellering mark och kantbalk för kontroll av semi-infinit mark. Modellen visar isoleringsförmågan hos marken. Modellen är modellerad med temperaturfördelning i COMSOL®.

För en korrekt analys för referensfallet har marken flyttats ned för att ingen värme skall kunna gå i horisontalled. All värme transporteras då vertikalt genom plattan innan det sprids i marken. I Figur 36 visas temperaturfördelningen av 2D-modellen med referensfall för kantbalk.



Figur 36. Temperaturfördelning i Celsius av 2D kantbalk kontra referensfall.

I Figur 37 visas påverkan från takfot möte yttervägg genom Total heat flux magnitude.



Figur 37. Total heat flux magnitude [W/m²K] för 2D och 3D kantbalk.

Resultatet av beräkningsmetoderna till kantbalk redovisas nedan i Tabell 10.Tabell 8. Resultat av köldbrygga vid ytterväggshörn

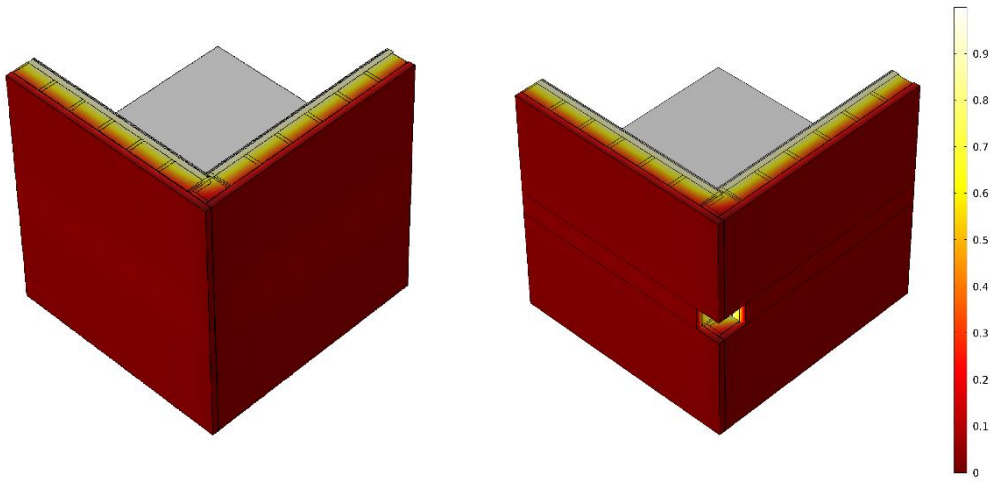
Tabell 10. Resultat kantbalk

Kantbalk, (platta på mark/yttervägg)	3D	2D	Handberäkning
U-värde referensfall [W/m²K]	0.0867	0.0871	0.1066
Värmetransmision genom referensfall (W/mK)	0.5523	0.5551	
Värmetransmision genom verkligtfall (W/mK)	0.8151	0.8133	
Köldbrygga (W/mK)	0.2628	0.2582	
Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	32.24 %	31.75 %	

Kantbalken är en komplicerad byggnadsdel och likt golvet beror den på flera parametrar för att utvärderas korrekt. Skillnaden mellan 2D och 3D är dock väldigt liten eftersom byggnadsdelarna är homogena.

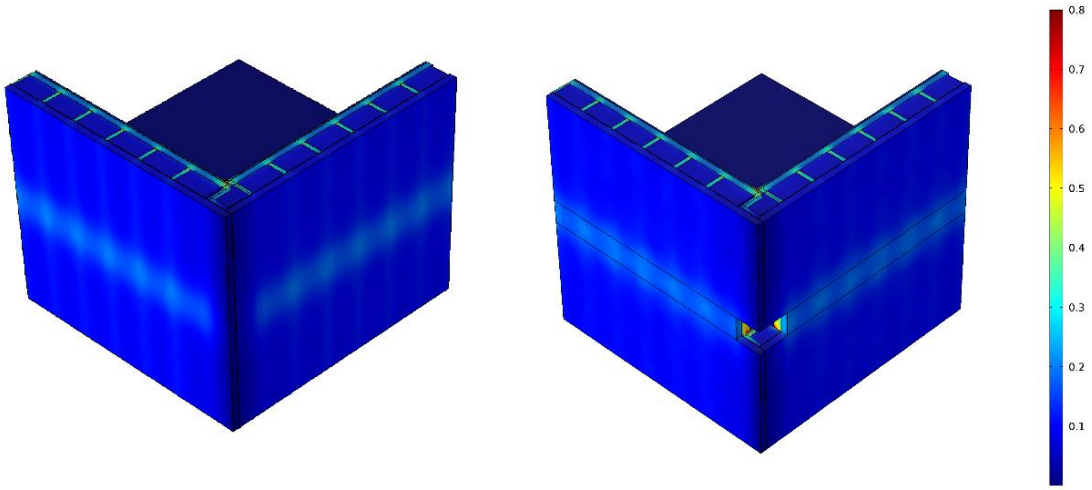
5.3 Punktköldbrygga - Ytterväggshörn möter mellanbjälklag

Där mellanbjälklag möter ytterväggshörn skapas en punktköldbrygga. Denna beräknas genom teorin beskriven i kapitel 4.4. Modellen är uppbyggd av de båda fallen som redovisas komplett i kapitel 5.2.1 och 5.2.2. Således blir köldbryggan inte korrekt avgränsad. Byggnadsdelen är 2700 mm bred respektive 2605 mm bred (insida mått). Höjden är 3045 mm. Temperaturfördelningen beter sig likt resultatet från mellanbjälklag möter yttervägg Figur 25 och Ytterväggshörn enligt Figur 38, här framträder punktköldbryggan mötet mellan byggnadsdelarna och beskriver punkten som inte beaktas i modellering i 2D.



Figur 38. Temperaturfördelning i Celsius av 3D mellanbjälklag möter ytterväggshörn kontra referensfall.

I Figur 39 visas påverkan från punktköldbrygga i ytterväggshörn tillsammans igenom Total heat flux magnitude.



Figur 39. Total heat flux magnitude [W/m^{2}K] för 3D mellanbjälklag möter ytterväggshörn kontra referensfall.

Resultatet av beräkningsmetoderna till punktköldbrygga i ytterväggshörn redovisas nedan i Tabell 11.

Tabell 11. Resultat punktköldbrygga, mellanbjälklag möter ytterväggshörn

Ytterväggshörn-Bjälklag	3D
Värmetransmision genom verkligt fall (W/K)	2.0251
Värmetransmision genom referensfall (W/K)	2.0153
Köldbrygga (W/K)	0.0098
Andel (W/K) som transmitteras via köldbryggan	0.48 %

Denna köldbrygga verkar endast i en punkt och är proportionerlig mot förekomsten, vilket gör att den inte ökar likt de linjära köldbryggorna om byggnaden blir större. Med hänsyn till detta har inte analys av andra punktköldbryggor prioriterats. Resultatet från punktköldbrygga utreds normalt inte vid analys i 2D.

5.4 Sammanfattning av resultat

För att enklare kunna dra slutsatser och jämföra resultat sammanställs här två tabeller med värden från de olika beräkningsmetoderna för respektive byggnadsdel.

5.4.1 Tabell för U-värdeberäkningar

Tabell 12. Sammanfattning av resultat för köldbryggor i klimatskärmen.

U-värde analys		3D	2D	Handberäkning
Vägg	U-värde för regelvägg	0.1013	0.1040	0.1000
	Skillnad i % för U-värde jämfört med 3D		2.66 %	-1.34 %
Tak	U-värde för regelvägg	0.0915	0.0920	0.0952
	Skillnad i % för U-värde jämfört med 3D		0.59 %	4.13 %
Golv	U-värde för platta+mark	0.0835	0.0835	0.1066
	Skillnad i % för U-värde jämfört med 3D		-0.03 %	27.62 %

5.4.2 Tabell över byggnadsdelar med köldbryggor

Tabell 13. Sammanfattning av resultat för konstruktioner med köldbryggor.

Analyserade byggnadsdelar med köldbryggor		3D	2D	Skillnad 3D mot 2D
Mellanbjälklag-yttervägg	Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0.3536	0.3622	2.42 %
	Köldbrygga (W/mK)	0.0745	0.0751	0.89 %
	Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	21.06 %	20.74 %	
Ytterväggshörn	Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0.3082	0.3126	1.42 %
	Köldbrygga (W/mK)	0.0399	0.0400	0.0029
	Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	12.93%	12.79%	
Takfot-yttervägg	Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0.2971	0.3015	1.48 %
	Köldbrygga (W/mK)	0.0308	0.0309	0.50 %
	Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	10.36%	10.26%	
Kantbalk	Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0.8151	0.8133	-0.22 %
	Köldbrygga (W/mK)	0.2628	0.2582	-1.75 %
	Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	32.24 %	31.75 %	

6 Diskussion

I diskussionen resonerar författarna kring resultatet, men även andra tankar som uppkommit längs arbetets väg. Detta för att belysa för- och nackdelar hos de olika beräkningsmetoderna.

Vid modellering i tre dimensioner tas alla geometrier, dess parametrar och möten i beaktning, detta leder till en noggrann analys som kan anses vara mycket likt verkligheten. Vid modellering i två dimensioner beaktas inte påverkan från möten vid korslagda skikt, vilket leder till en mindre noggrann analys än 3D.

Resultatet i rapporten visar att det ofta är liten skillnad mellan 2D och 3D-analyserna. En liten skillnad på decimaler i U-värde kan få stor inverkan vid stora byggnader då detta värde påverkar energiförlusten proportionellt mot arean för byggnaden. För linjeköldbryggor är energiförlusterna proportionella mot längden för köldbryggan. De numeriska beräkningarna i Svensk standard antas ge ett resultat med felsäkerhet på 5 %. Alla resultat från 2D analyserna ligger inom 2,7 % av 3D-fallet. Enligt Svensk standard uppskattas numeriska beräkningar ha en felsäkerhetsmarginal på 5 %. Detta gör att 2D-modellena i rapporten kan anses pålitliga. Speciellt då det finns felsäkerhet i resultatet för 3D. Kraven för precisionen av resultatet påverkas av beställarens krav på beräkningar. Vilken noggrannhet som efterfrågas av beställaren är ofta direkt kopplade till ökade kostnader för projektering. Ekonomi är alltid en oundviklig faktor som avgör vilken noggrannhetsnivå i beräkningarna som efterfrågas. Detta är viktigt att beakta för en lämplig rekommendation vid val av beräkningsmetod för respektive köldbrygga. Frågan handlar slutligen om vad beställaren är beredd att betala för ett noggrannare resultat.

Noggranna resultat är ofta att föredra men det kan ändå anses rimligt att ha en felmarginal inom ett par procent från ett exakt teoretiskt resultat. Med hänsyn till att förenklingar görs av verkligheten för att kunna modellera, så kan detta påverka resultatet mer än osäkerheten i beräkningsmetoderna. Det finns risk att syftet med noggranna beräkningarna går förlorade om montaget av den verkliga byggnaden inte är utfört korrekt. Det verkliga utfallet beror alltså på att konstruktionsritningarna efterföljs. Krav ställs på att konstruktionslösningarna är korrekta och genomförbara i det faktiska byggskedet. Baseras energiberäkningarna på felaktiga konstruktionsritningar återspeglar resultatet från beräkningarna inte det verkliga utfallet. Effekten av köldbryggor kan även förstärkas om utfallet inte efterliknar ritningarna, detta på grund av att effekter från köldbryggor inte alltid prioriteras om komplikationer uppstår.

För de numeriska analyserna i rapporten har metoden mesh-independence använts för att kontrollera resultatet av mesh-geometrin. Numeriska beräkningar är beroende av att användaren kan hantera indata på rätt sätt. Om komplexa modeller för beräkningar av köldbryggor används ökar risken för fel i modellen. Vid små fel i indata, parametrar och geometrier kan slutresultatet påverkas genom beräkningsfel. Användaren behöver förstå uppbyggnaden av den använda programvaran för att kunna säkerställa pålitligheten av resultatet.

Resultatet av handberäkningarna i jämförelse av U-värden mellan beräkningsmetoderna, stämmer väl överens för byggnadsdelarna vägg och tak. Handberäkningarna för vägg och tak ger ett lägre U-värde än motsvarande 3D beräkning. Det kan härledas till att värmeflödet endast tillåts transmitteras i en dimension. För taket skiljer U-

värdeberäkningarna för handberäkning åt med drygt 4 % från 3D modelleringen. En felmarginal på 4 % kan anses vara tillåtet för handberäkningar, dock bör konstruktören vara medveten om denna osäkerhet när handberäkningar utförs. Då komplexiteten i byggnadsdelarna ökar kan denna skillnad bli ännu större. För handberäkningar av golvplattan uppgår skillnaden i resultatet till 27.62 % för motsvarande jämförelse. Denna skillnad kan anses vara allt för framstående för slutgiltigt resultat och kräver en analys med en mer noggrann beräkningsmetod. Val av handberäkningsmetoden vid energiberäkning av golv och mark kan därför omedvetet leda till att golvet isoleras ytterligare för att klara av kraven för transmissionsförluster för golv. Detta är inte nödvändigt då resultatet för handberäkningarna har visats sig avvika från 3D-beräkningen. 3D-beräkningen antas vara mest korrekt. Då kantbalken är den konstruktionsdel som transmitterar mest värme per meter är det motiverat att göra en noggrannare analys för denna byggnadsdel. En noggrannare analys av värmetransmissionen för golv kan alltså leda till kostnadsbesparingar för material men även ett bättre materialutnyttjande.

Att överskatta byggnadsdelars behov av värmeisolerande material för värmetransmission vid handberäkningar anses ofta vara tillåtet i branschen. Detta för att det framräknade resultatet av den slutgiltiga energiförbrukningen då kommer ligga på rätt sida av kraven för energianvändning. På grund av osäkerhet i beräkningar och osäkerhet i hur byggnaden faktiskt sammanställs anses detta vara en trygg metod för att vara säker på att energikraven efterföljs för den faktiska byggnaden. Med tanke på att resultatet för handberäkningarna har varierat för de olika modellerna i arbetet kan detta leda till att byggnader isoleras mer än vad som är nödvändigt. Genom att göra noggrannare analyser för de konstruktionsdelar där det misstänks transmittera stor andel värme kan pengar sparas genom mindre användning av värmeisolerande byggnadsmaterial. Noggrannare beräkningar tar längre tid vilket leder till större kostnader för projektering, det blir således en avvägning om hur mycket noggrannare beräkningar eventuellt kan spara på materialkostnad jämfört med den ökad projekteringskostnad.

Det behövs fler studier på området för att ge generella rekommendation för beräkning av köldbryggor. Författarna har misstankar om att tredimensionella effekter kan framstå mer vid konstruktioner som är uppbyggda av stålreglar. Resultatet från de undersökta köldbryggorna i denna rapport visar att 2D-modellering kan anses ligga nära verkligheten. En egen utvärdering på storleken av de tredimensionella effekterna bör utföras innan val av beräkningsmetod.

6.1 Felkällor

Författarna har gjort förenklingar av verkligheten för att kunna underlätta modelleringsarbetet samt minska beräkningstiden. Om dessa förenklingar inte gjorts kunde eventuellt resultaten avvikit mer. Eventuella 3D-effekter som kan tänkas uppkomma kan se annorlunda ut för en andra typer av konstruktionsdetaljer.

7 Slutsats

I det här kapitlet slutförs diskussionen genom att dra slutsatser från arbetet som helhet.

Slutsater som kan dras från arbetet är att tvådimensionella beräkningar kan anses ligga nära verkligheten och inom gränserna för numeriska beräkningar från Swedish Standard Institute. Skillnaderna i resultat mellan utvärdering i 2D och 3D är i rapporten liten. Enligt resultat i rapporten kan de tredimensionella effekterna uppgå till ett par procent. Beroende på kravbild kan denna skillnad anses vara tillräckligt noggrann men effekten av tredimensionella effekter kan variera från byggnad till byggnad. En generell slutsats kan därför inte tas fram för rekommendation för beräkning av köldbryggor, utan mer studier behövs. Dock påvisar resultatet i denna rapport att utvärdering i två dimensioner kan vara tillräckligt noggrann i de flesta fall.

För beräkningar av värmetransmission i mark och kantbalk rekommenderar författarna att följa metoden som Hannes Nyberg beskriver i exjobbet *Thermal bridges at foundations - Evaluation of heat calculation methods.* Då golvplattor ofta är homogena räcker det att använda 2D-beräkning för golv.

Modellering av köldbryggor kan vara komplicerat då det framräknade resultatet skall motsvara det verkliga utfallet, vilket beror på faktorer som kan vara svåra att förutspå. Faktumet kvarstår att komplicerade modeller tar lång tid att modellera. Att utvärdera köldbryggors påverkan i 3D kan ta mycket tid i anspråk, speciellt där ritningsunderlaget enbart finns i 2D. Beroende på ritningsunderlag är det önskvärt att välja 2D före 3D för att minimera modelleringstiden.

7.1 Förslag till framtida arbeten

- Kontrollera påverkan från respektive köldbrygga mot en hel byggnad.
- Kontroll mot skillnader för de standardutförda värdena i Swedish Standard Insitute, SS-EN ISO 14683:2007.
- Utvärdera tredimensionella effekter i byggnad uppbyggd av tunna stålprofiler.

8 Litteraturförteckning

Boverket. (2012). *Handbok för energihushållning enligt Boverkets byggregler*. Hämtat från http://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/publikationer/

Boverket. (2016). *BBR - Boverkets byggregler*. Hämtat från http://www.boverket.se/contentassets/a9a584aa0e564c8998d079d752f6b76d/konsoliderad_bbr_2011-6.pdf

Cembrit AB. (2013). *Cembrit Windstopper - Minerit concept.* Produktdatablad.

Danebjer, M., & Ekström , T. (2012). *Köldbryggor i lågenergihus - Byggnadssystemens inverkan på transmissionsförluster*. Instutionen för bygg och miljöteknologi, (Examensarbete, Lunds Univeristet. Hämtat från http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/3159976

Engström , A., & Karlsson , J. (2016). *Köldbryggors påverkan på flerbostadshus från sent 60-tal.* (Examensarbete, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för bygg- och miljöteknik). Hämtat från http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/245195/245195.pdf

Gölén , L., & Persson, E. (2012). *Utvärdering av köldbryggor - En inventering och utveckling av Skanskas Standardbyggdelar.* (Examensarbete, Lunds tekniska högskola Ingenjörshögskolan Helsingborg, Institutionen för bygg- och miljöteknologi/byggnadsfysik). Hämtat från http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/2837379

Hagentoft, C.-E. (2001). *Introduction to building physics* (1:7 uppl.). Lund: Studentlitteratur AB.

Johansson, J., & Månsson, T. (2013). *Enhancement of Villa Vänern - Achieving the grade GOLD in the Swedish environmental classification system Miljöbyggnad.* (Examensarbete, Chalmers Tekniska Högskola, Bygg- och miljöteknik). Hämtat från http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/184616/184616.pdf

Karlsson, F., & Mani, S. (2015). *Beräkning och sammanställning av linjära köldbryggor: En jämförelse mellan HEAT2 och COMSOL Multiphysics.* (Examensarbete, Kungliga Tekniska Högskolan). Hämtat från http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:857981/FULLTEXT01.pdf

Lindab. (u.d.). *Lindab ytterväggsreglar Teknisk information.* Hämtat från http://www.lindab.com: http://www.lindab.com/se/documents/byggkomponenter%20och%20hall%20pdf/ytterv%C3%A4ggsreglar%20teknisk%20information.pdf.

Nilsson, B. (2016). Finita Elementmetoden - En kort introduktion till teorin. *Föreläsningsunderlag.* Högskolan i Halmstad.

Nyberg, H. (2011). *Thermal bridges at foundations - Evaluation of heat calculation methods.* (Examensarbete, Chalmers tekniska högskola, Instutionen för Bygg- och miljöteknik). Hämtat från http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/155743.pdf

Peterson, B.-Å. (2013). *Tillämpad byggnadsfysik* (Upplaga 5:1 uppl.).

Regeringskansliet. (2015). *Regeringskansliet*. Hämtat från Regering.se: http://www.regeringen.se/regeringens-politik/energi/energieffektivisering/mal-for-energieffektivisering/

Swedish Standard Insitute. (SS-EN ISO 10211:2007). Köldbryggor i byggnadskonstruktioner - Värmeflöden och yttemperaturer - Detaljerade beräkningar. Hämtat från https://enav.sis.se/sv/Standard/?std=STD-64452

Swedish Standard Institute. (ISO SS-EN ISO 13370:2007). Byggnaders termiska egenskaper – Värmeöverföring via marken marken – Beräkningsmetoder (ISO 13370:2007). Hämtat från https://enav.sis.se/sv/Standard/?std=STD-64457

Swedish Standard Institute. (SS-024230:1989). Värmeisolering - Plåtkonstruktioner med kölbryggor - Beräkning av värmemotstånd.

Swedish standard institute. (SS-EN ISO 14683:2007). Thermal brigdes in building construction - linear thermal transmittance - simplified methods and default values. Hämtat från https://enav.sis.se/sv/Standard/?std=STD-64297

Swedish Standard Institute. (SS-EN ISO 6946:2007). Byggkomponenter och byggnadsdelar - Värmemotstånd och värmegenomgångskoefficient - Beräkningsmetod. Hämtat från https://enav.sis.se/sv/Standard/?std=STD-64463

Wingård, G. (2009). *Metoder för köldbryggeberäkningar i designprocessen.* (Examensarbete, Kungliga Tekniska Högskolan, Institutionen för Byggvetenskap). Hämtat från https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:423881/FULLTEXT01.pdf

BILAGA – BERÄKNINGAR OCH RESULTAT

Här redovisas resultatet av våra utförda beräkningar. Ritningar och beräkningsmodeller från COMSOL® redovisas för att ge insyn i modellernas uppbyggnad.

Handberäkningar

Yttervägg

s,450	
Andel trä (45mm)	0.1
Andel isolering (405mm)	0.9

Byggnadsdel YV1	Tjocklek (m)
Gips	0.025
Horisontella träreglar/mineralull s,450	0.07
Ångspärr	0
Mineralull/stående träreglar s,450	0.22
Cembrit windstopper	0.006
Fasadskiva	0.08
Rsi+Rsi	0
	0.401

λ-värdesmetod		
Skikt planparallella vikelrätt värmeriktning	sammanvägd λ	Värmeresitans R per skikt
Gips		0.11
horisontella träreglar/isolering s,450	0.0437	1.60
Ångspärr		0.00
isolering/stående träreglar s,450	0.0437	5.03
Cembrit windstopper		0.02
Fasadskiva		2.42
Rsi+Rsi		0.26
Total värmeresitans		9.45

u-värdesmetod	A	B	C	D
Skikt i värmeriktning	70 trä 220 trä	70 isol 220 trä	70 trä 220 isol	70 isol 220 isol
Andel	0.01	0.09	0.09	0.81
Värmeresitans R per sammansatt skikt	2.07	3.69	7.17	8.79
Värmeresitans R per skikt	4.87	6.49	9.96	11.59
Uu (invers av R gånger andel)	0.00	0.01	0.01	0.07
U-värde				0.09
Rtu				10.54

Rtot=(Rλ+Ru)/2 10.00 $m^2 K/W$

U-värde byggnadsdel 0.10 W/m^2K

Tak

	Lilla ytan	Stora ytan		
s.450 1 70/450	0.16	0.84		
S.1200 60/1200	0.05	0.95	λ-värdesmetod	
			sammanvägd λ	R
Tak T1	Tjocklek (m)			
Rsi				0.1
Gips	0.025			0.11
horisontella träreglar/isolering s.450	0.035		0.05	0.71
isolering/Fanérbalk s.1200	0.45		0.05	9.70
Träfiberskiva/Fanérbalk s.1200	0.005		0.14	0.04
Rsi				0.10
Summa (tjocklek+Rtot)	0.515			10.75

u-värdesmetod	A	B	C	D
tre olika cc	trä trä	isol trä	trä isol	isol isol
Andel	0.01	0.04	0.15	0.80
Sammalagda R-skikt	3.75	4.56	11.00	11.81
R homogena material	4.06	4.87	11.31	12.12
Uu	0.00	0.01	0.01	0.07
Rtu				11.14

Sammanvägt R 10.94 $m^2 K/W$

U-värde byggnadsdel 0.09 W/m^2K

Mark och golvplatta

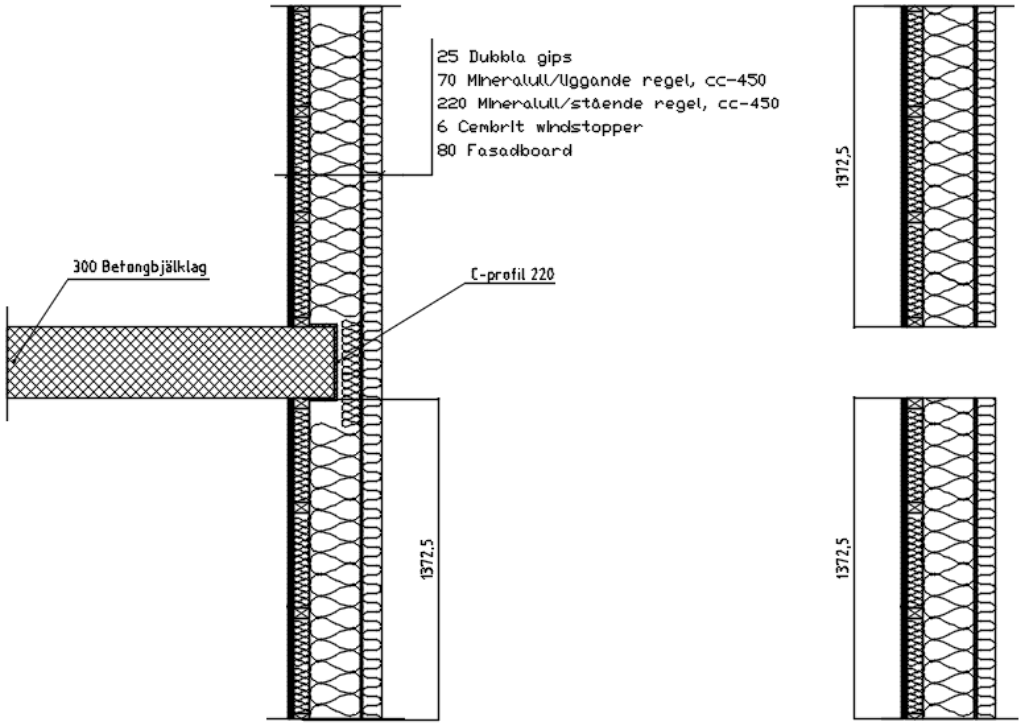
Byggnadsdel Golv	Tjocklek (m)	R (m^2k/W
Rsi		0.17
Betong	0.21	0.11
Grundisolering	0.1	2.78
Ångspärr		0.00
Grundisolering	0.2	5.56
Summa (tjocklek+Rtot)	0.51	8.61
U-värde byggnadsdel	0.12	
väggtjocklek	0.401	
R för platta och isolering	8.44	
bredd	8.00	
längd	13.33	
B´	5.00	
Mark, berg	3.50	
Enligt ISO		
U=	0.11	W/m^2K

1.1 Bilagor från numeriska analyser

1.1.1 Mellanbjälklag möter yttervägg

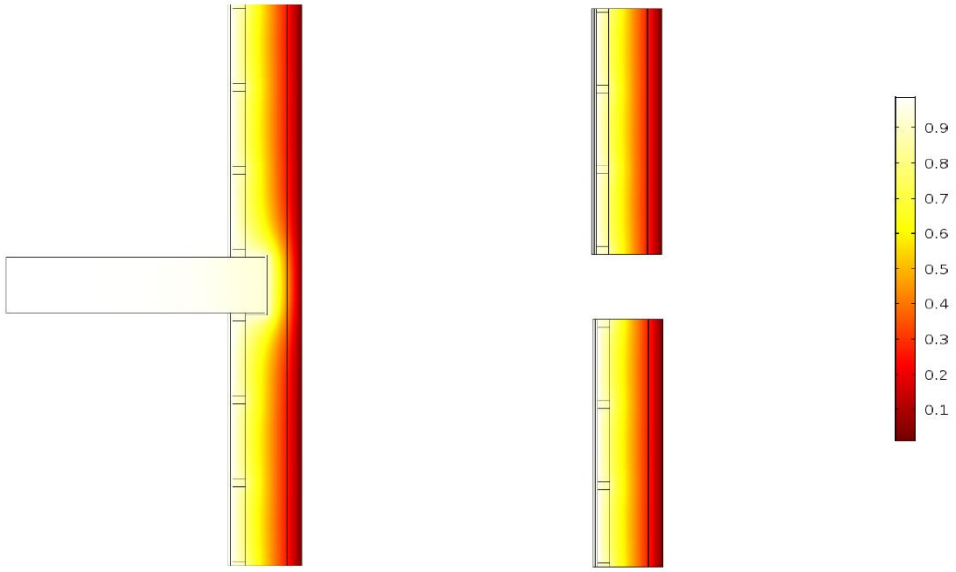
Här redovisas köldbryggan som uppstår mellan bjälklaget och ytterväggen. Avståndet mellan reglarna vid bjälklaget har anpassats så att bjälklaget får plats mellan däremellan, detta har antagits för att kunna jämföra bjälklag med referensfall och för att värmeflödena ska vara symmetriskt utformade.

Referensfallet till mellanbjälklaget möter yttervägg består av en regelvägg med samma centrumavstånd som verkliga fallet. Den övre delen av väggen har modellerats en gång och sedan spegelvänts för att motsvara ett referensfall för hela regelväggen då geometrin är anpassad för att vara identisk ovanför och under bjälklaget.

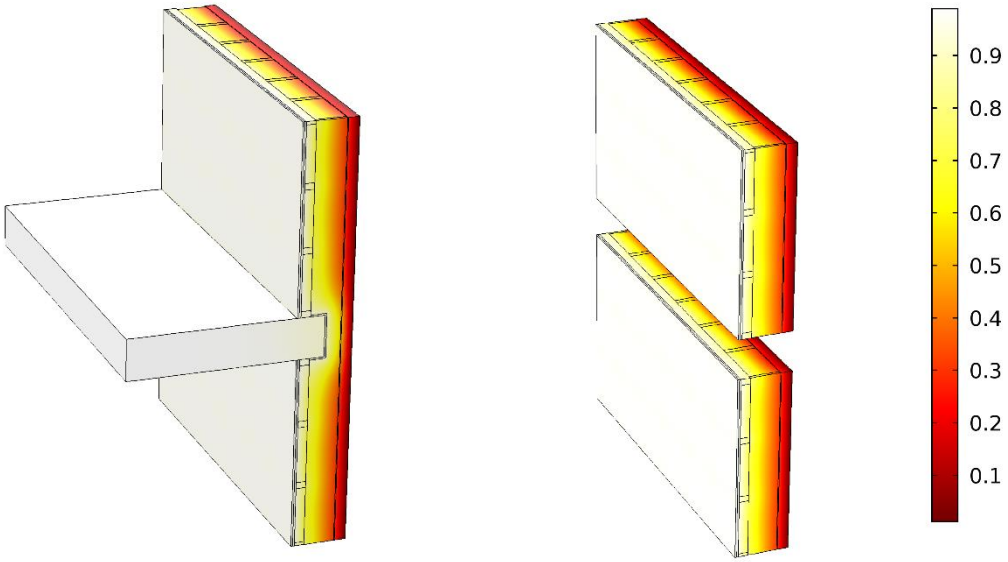


Figur 1. Ritning av mellanbjälklag möter yttervägg och referensfall.

I Figur 2 och Figur 3 redovisas temperaturfördelningen för 2D respektive 3D-modellerna för mellanbjälklag möter yttervägg.

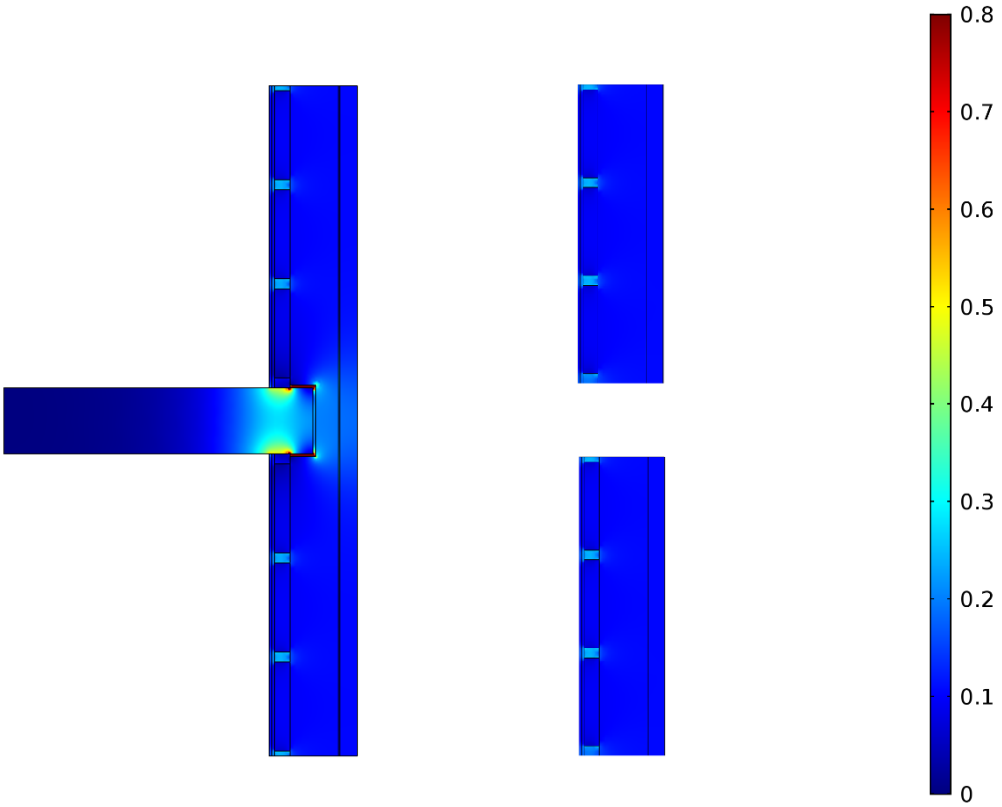


Figur 2. Temperaturfördelning av mellanbjälklag möter yttervägg i 2D kontra referensfall.

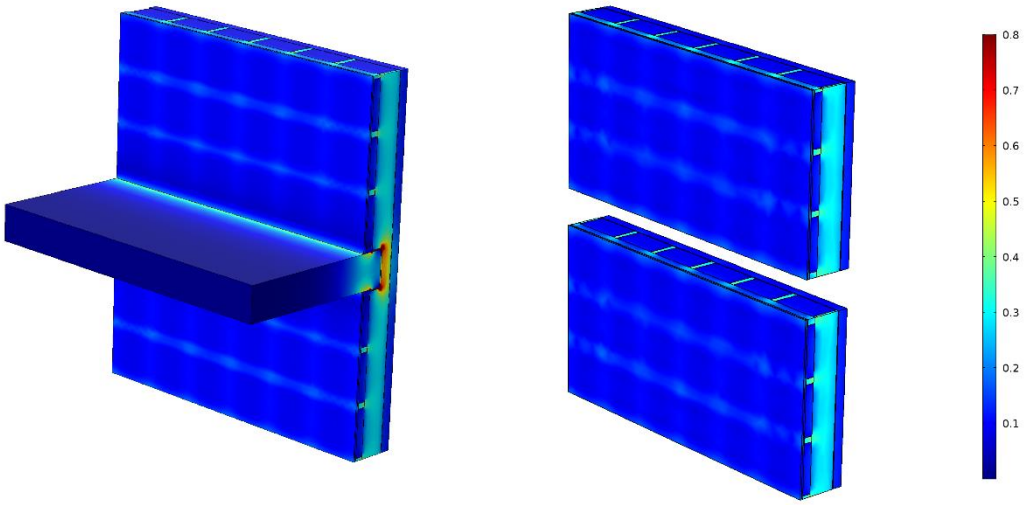


Figur 3. Temperaturfördelning av mellanbjälklag möter yttervägg i 3D kontra referensfall.

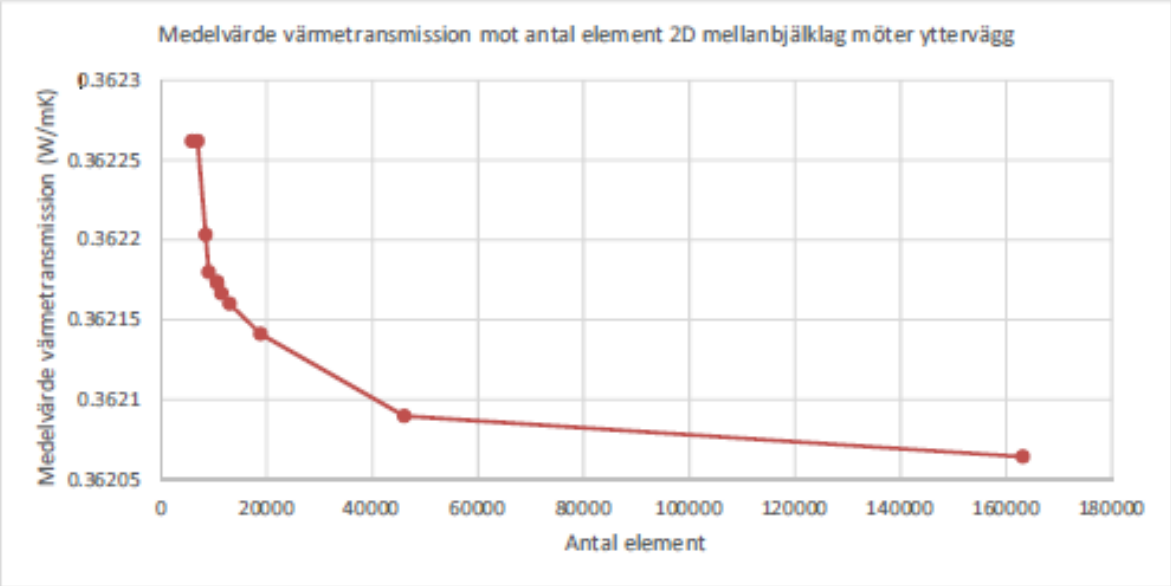
I Figur 4 och Figur 5 redovisas Total heat flux magnitude i W/m^2 för 2D respektive 3D-modellerna för mellanbjälklag möter yttervägg.

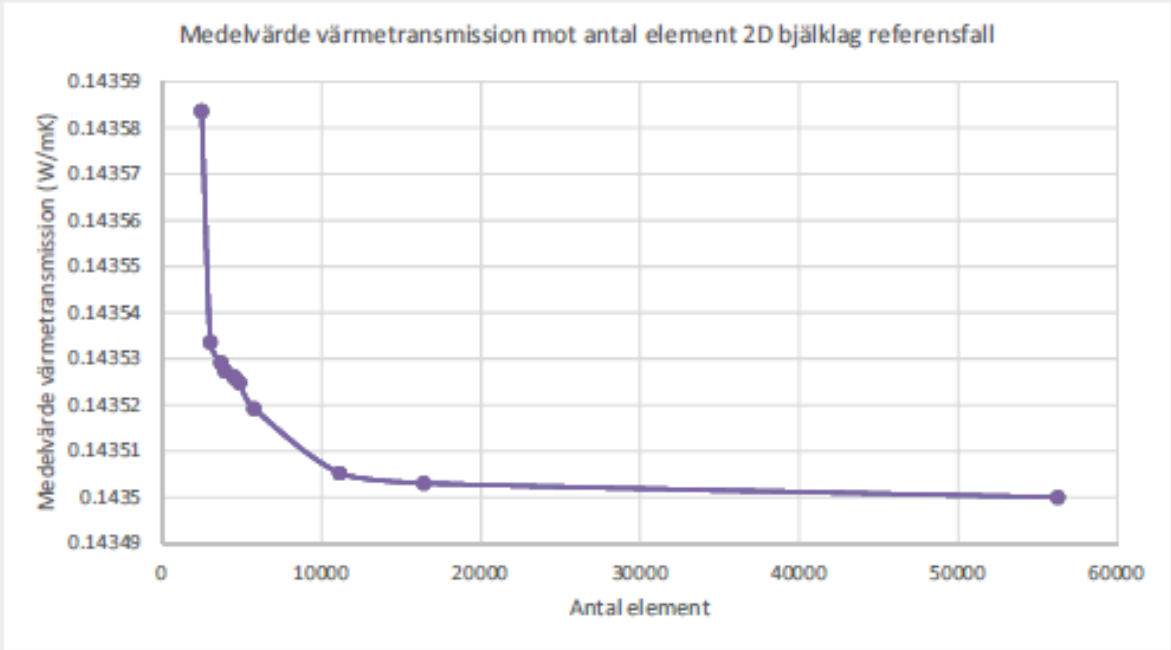


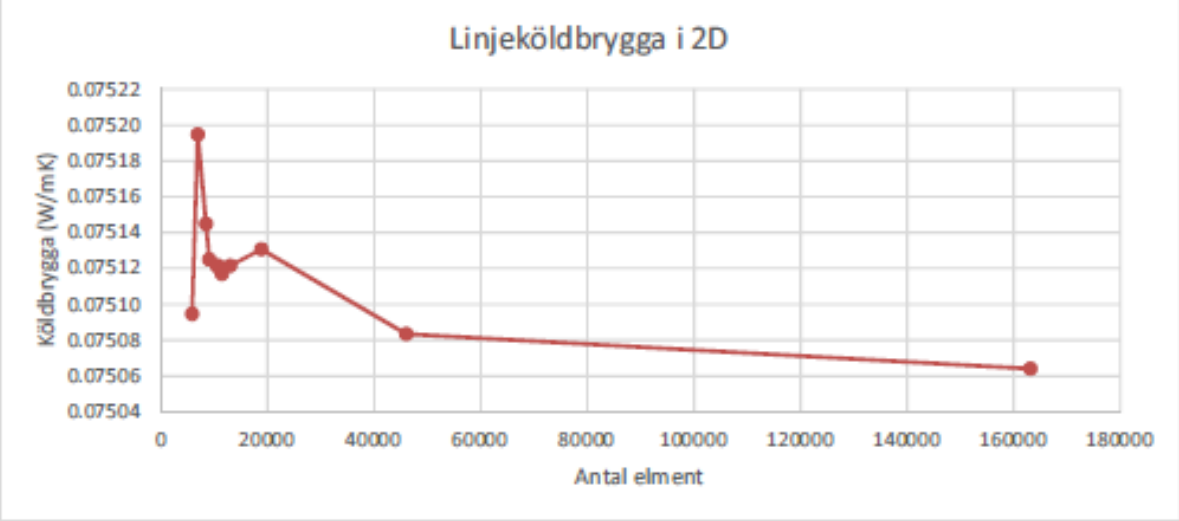
Figur 4. Total heat flux magnitude [W/m^2] för 2D mellanbjälklag möter yttervägg kontra referensfall.

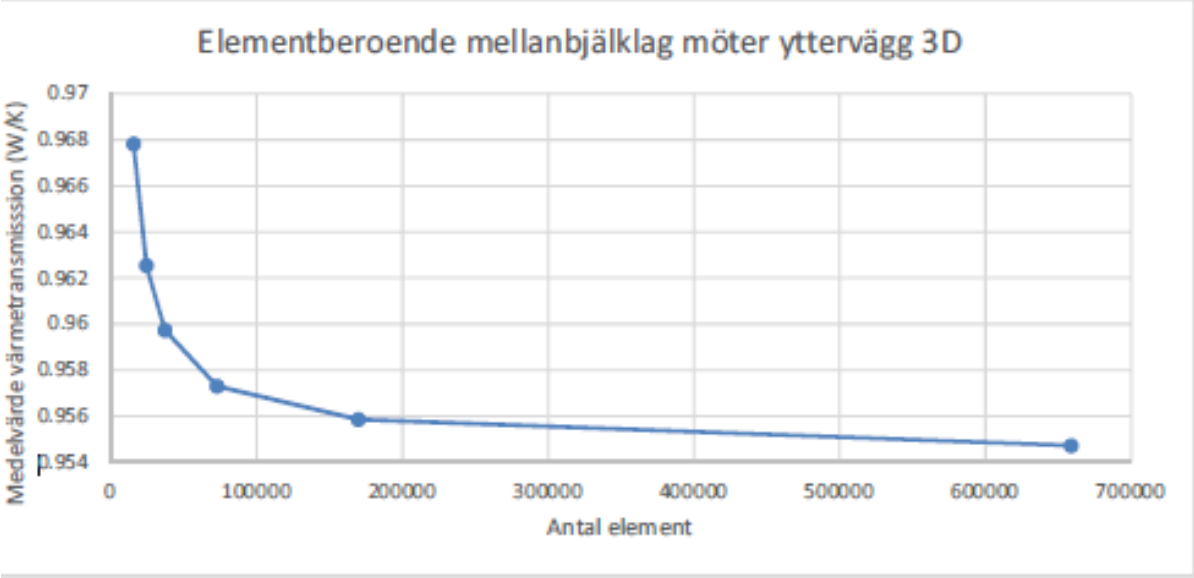


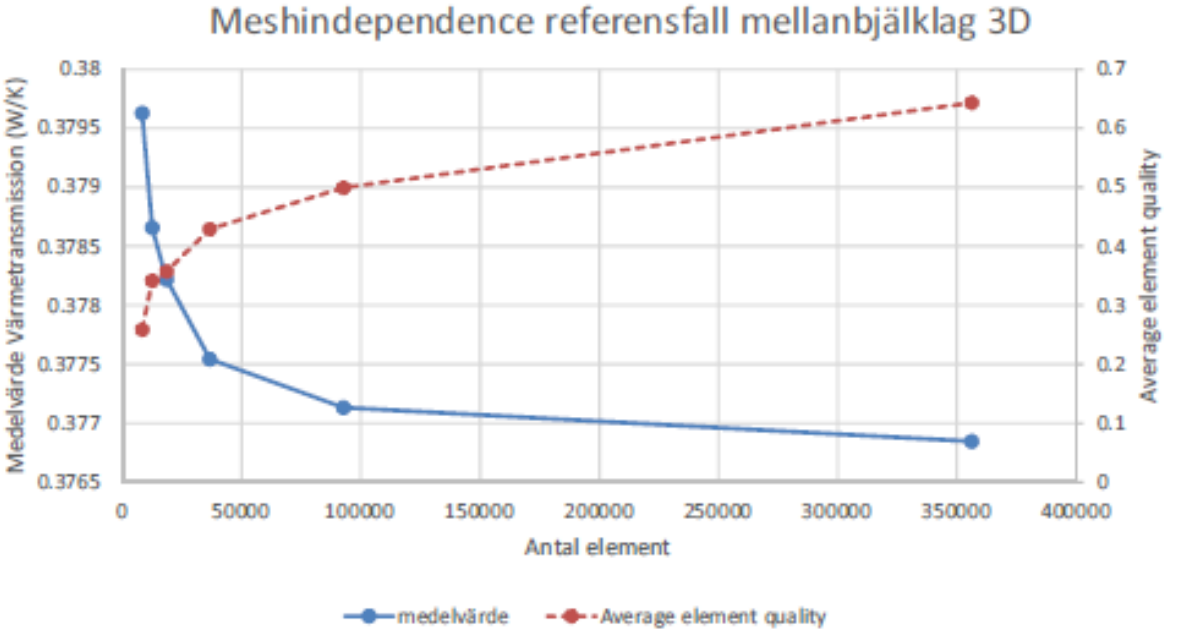
Figur 5. Total heat flux magnitude [W/m^2] för 3D mellanbjälklag möter yttervägg kontra referensfall.

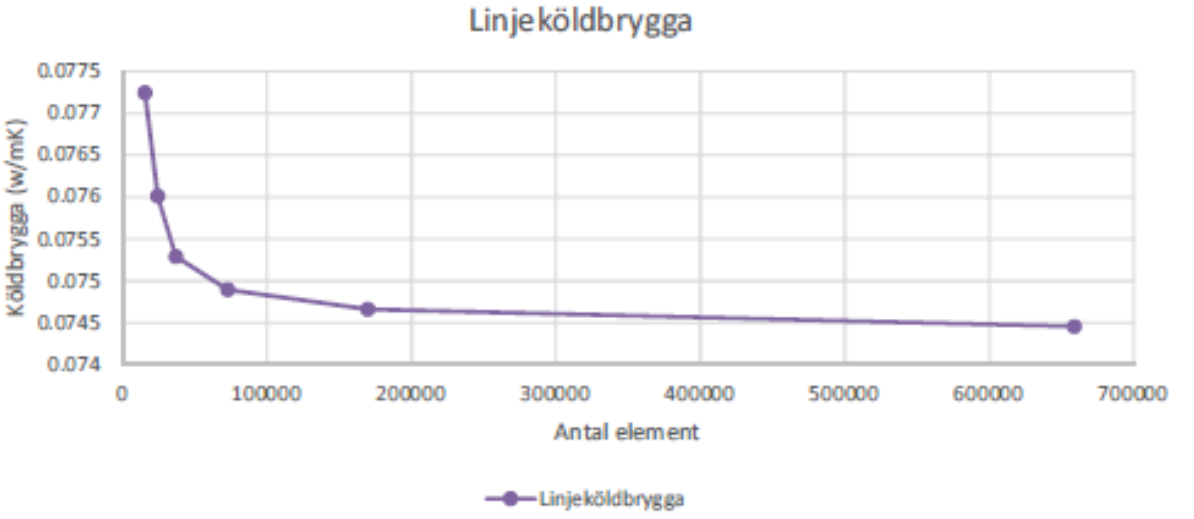

Medelvärde värmetransmission mot antal element 2D mellanbjälklag möter yttervägg
Medelvärde värmetransmission (W/mK)
0.3623
0.36225
0.3622
0.36215
0.3621
0.36205
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
160000
180000
Antal element


Medelvärde värmetransmission mot antal element 2D bjälklag referensfall
Medelvärde värmetransmission (W/mK)
0.14359
0.14358
0.14357
0.14356
0.14355
0.14354
0.14353
0.14352
0.14351
0.1435
0.14349
0
10000
20000
30000
40000
50000
60000
Antal element


Linjeköldbrygga i 2D
Köldbrygga (W/mK)
0.07522
0.07520
0.07518
0.07516
0.07514
0.07512
0.07510
0.07508
0.07506
0.07504
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
160000
180000
Antal elment


Elementberoende mellanbjälklag möter yttervägg 3D
Medelvärde värmetransmisssion (W/K)
0.97
0.968
0.966
0.964
0.962
0.96
0.958
0.956
0.954
0
100000
200000
300000
400000
500000
600000
700000
Antal element


Meshindependence referensfall mellanbjälklag 3D
Medelvärde Värmetransmission (W/K)
0.38
0.3795
0.379
0.3785
0.378
0.3775
0.377
0.3765
Average element quality
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
50000
100000
150000
200000
250000
300000
350000
400000
Antal element
medelvärde
Average element quality


Linjeköldbrygga
Köldbrygga (w/mK)
0.0775
0.077
0.0765
0.076
0.0755
0.075
0.0745
0.074
0
100000
200000
300000
400000
500000
600000
700000
Antal element
Linjeköldbrygga

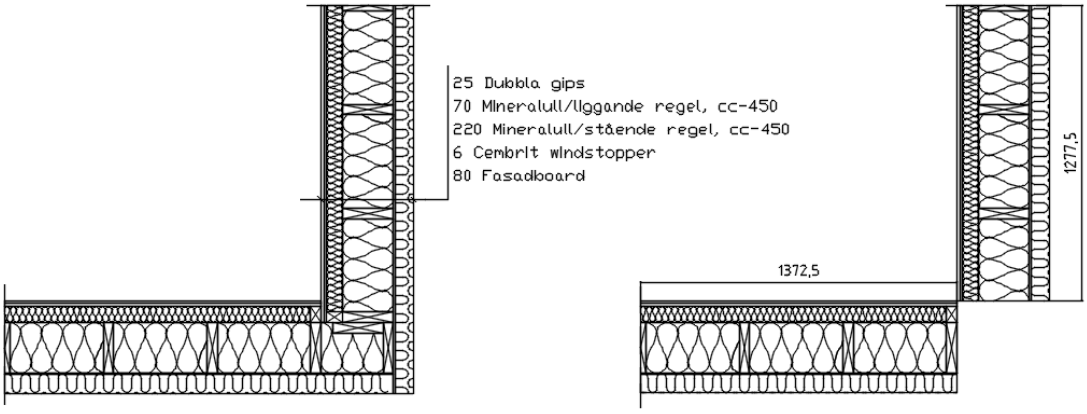
Resultatet av mellanbjälklagsanslutning till yttervägg redovisas nedan i Tabell 1.

Tabell 1. Resultat av anslutning mellanbjälklag-yttervägg.

Mellanbjälklag-yttervägg	3D (Fine mesh)	2D (Fine mesh)	Handberäkning
U-värde referensfall	0.1017	0.1046	0.1000
Skillnad i % för U-värdesberäkning mot 3D (Fine mesh)		2.83%	-1.68%
Värmetransmision genom referensfall (W/mK)	0.2791	0.2871	0.2750
Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0.3536	0.3622	
Köldbrygga (W/mK)	0.0745	0.0751	

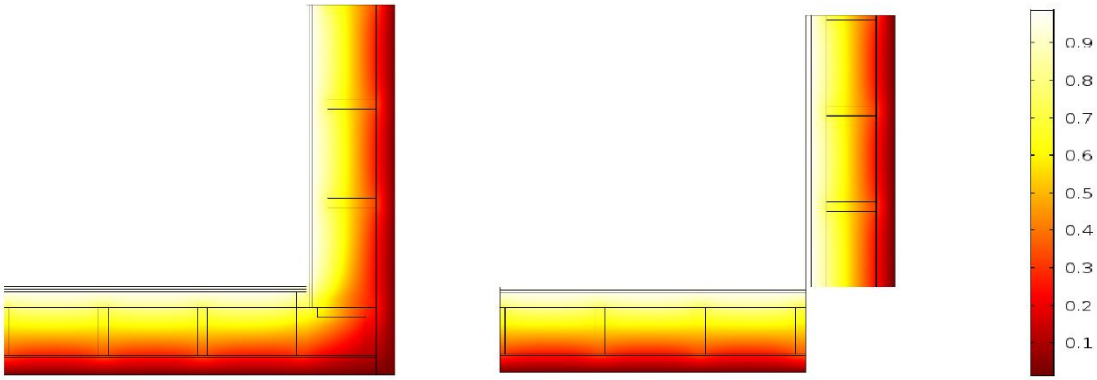
1.1.2 Ytterväggshörn

Ytterväggshörnet har anpassats så att det går att snitta byggandsdelen vinkelrät i hörnet för att kunna jämföra med referensfallet.

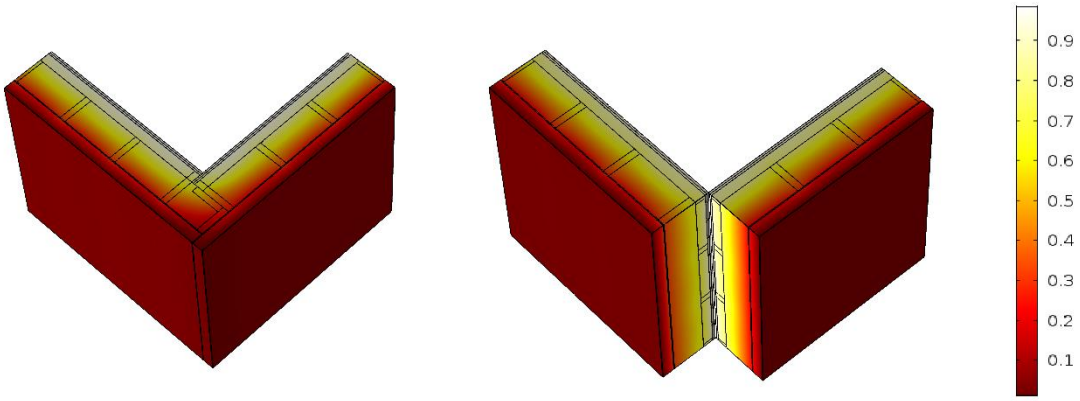


Figur 6. Ritning av ytterväggshörn och referensfall.

I Figur 7 och Figur 8 redovisas temperaturfördelningen för 2D respektive 3D-modellerna för ytterväggshörn.

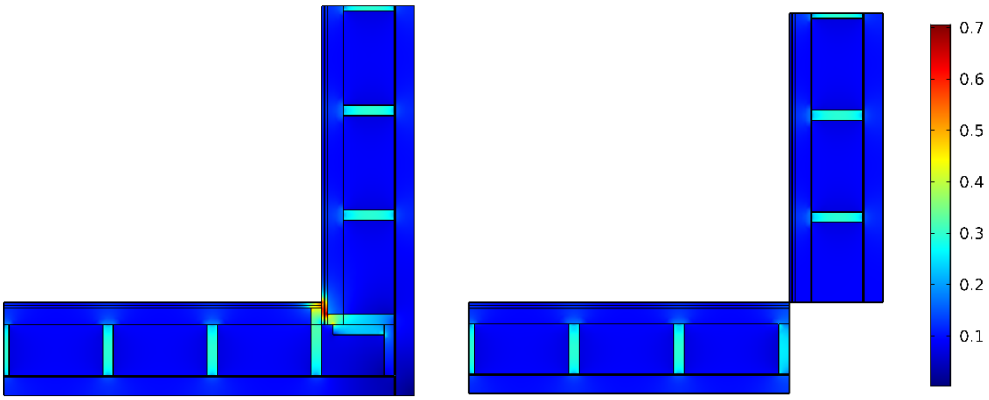


Figur 7. Temperaturfördelning i Celsius av 2D ytterväggshörn kontra referensfall.

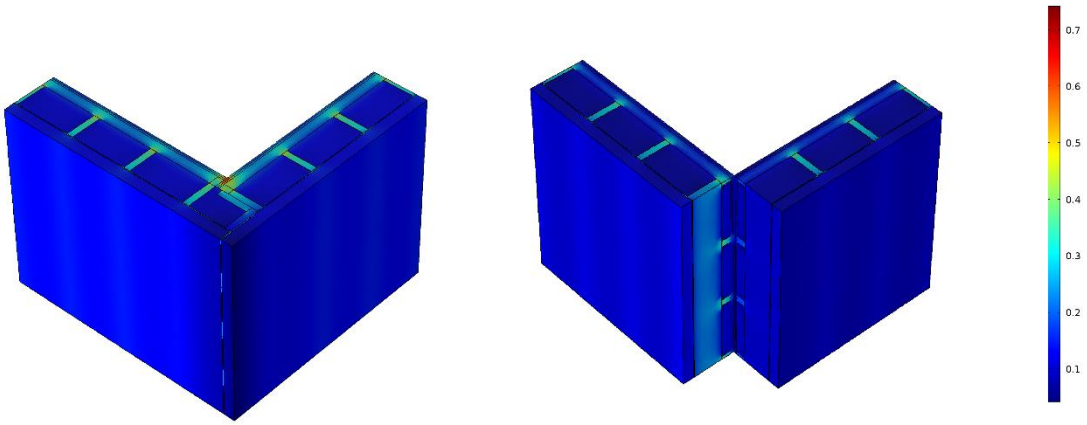


Figur 8. Temperaturfördelning i Celsius av 3D ytterväggshörn kontra referensfall.

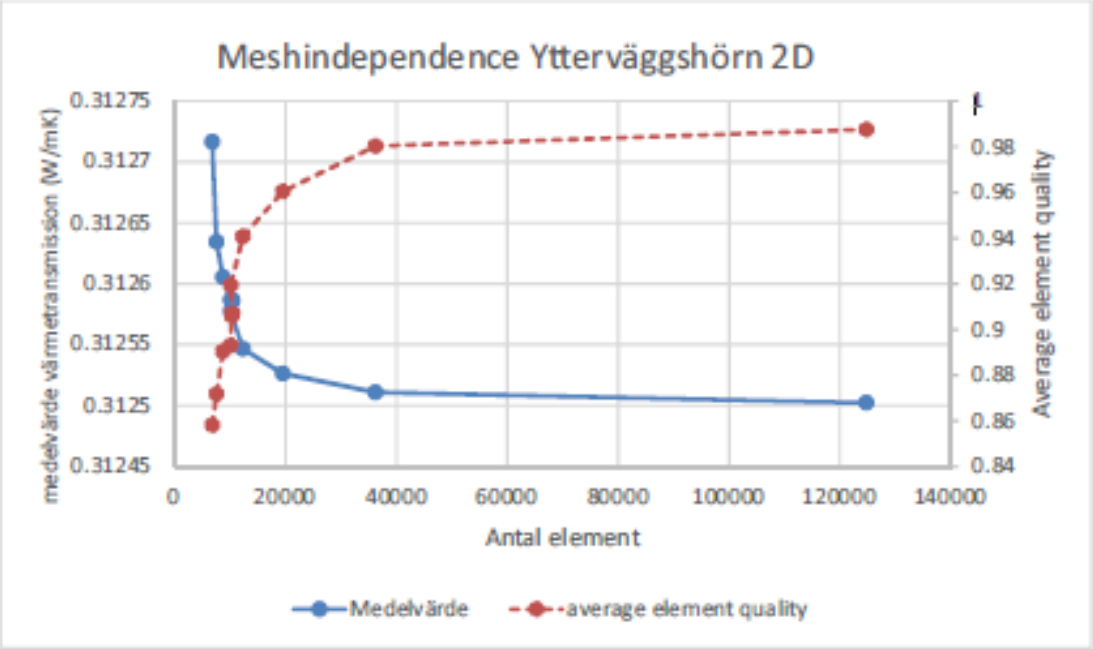
I Figur 9 och Figur 10 redovisas Total heat flux magnitude i W/m^2 för 2D respektive 3D-modellerna för ytterväggshörn.

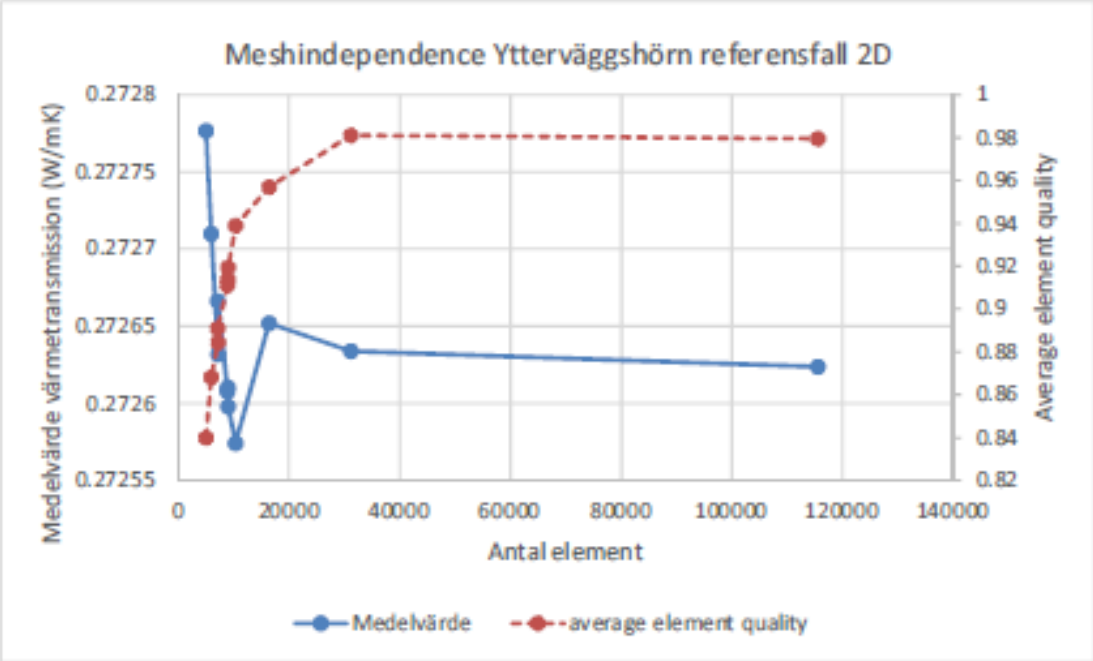


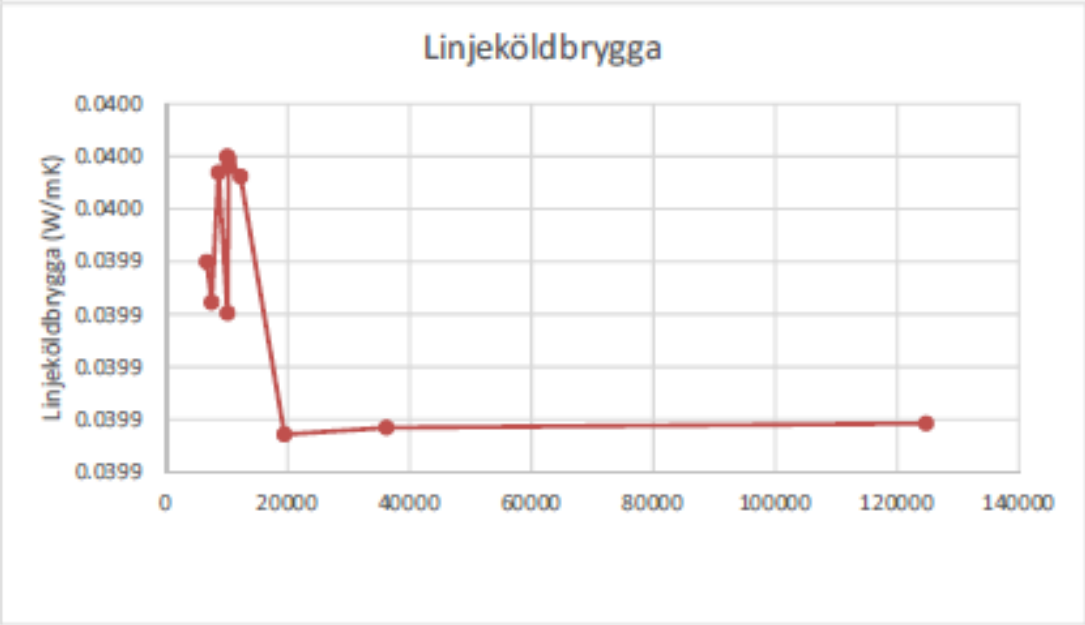
Figur 9. Total heat flux magnitude [W/m^2] för 2D mellanbjälklag möter yttervägg kontra referensfall.

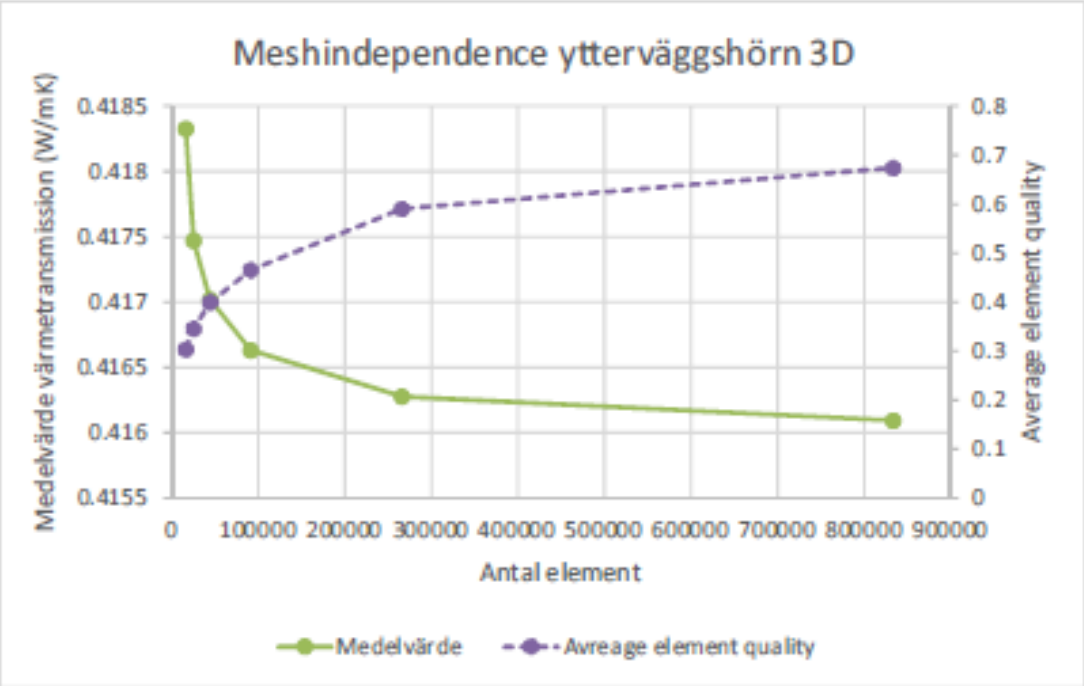


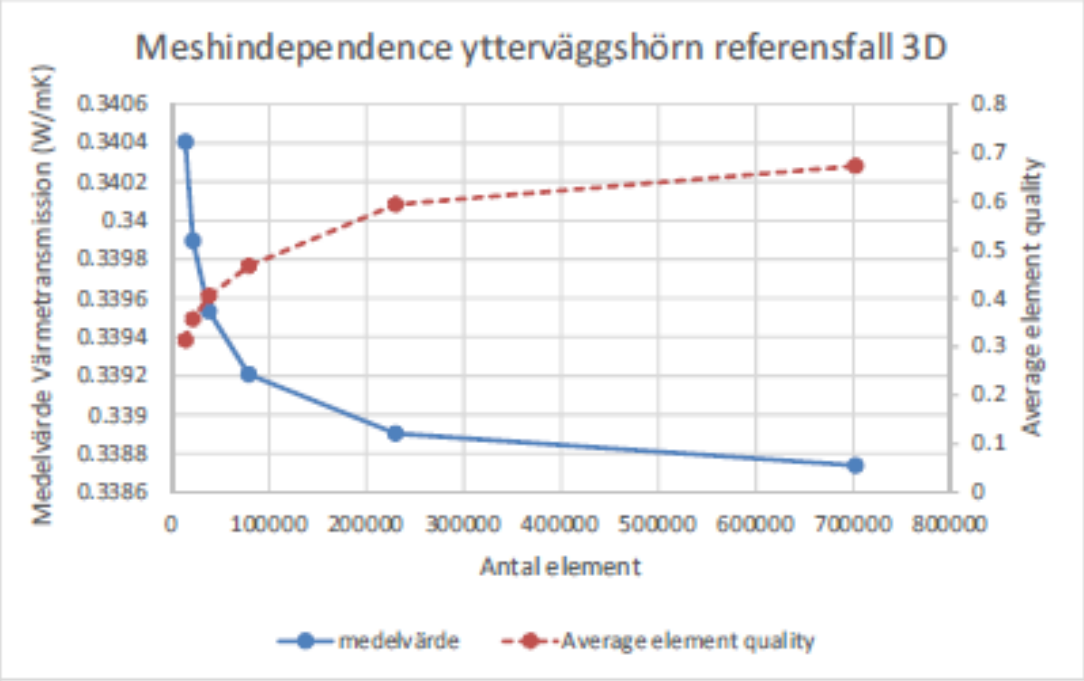
Figur 10. Total heat flux magnitude [W/m^2] för 3D ytterväggshörn kontra referensfall.

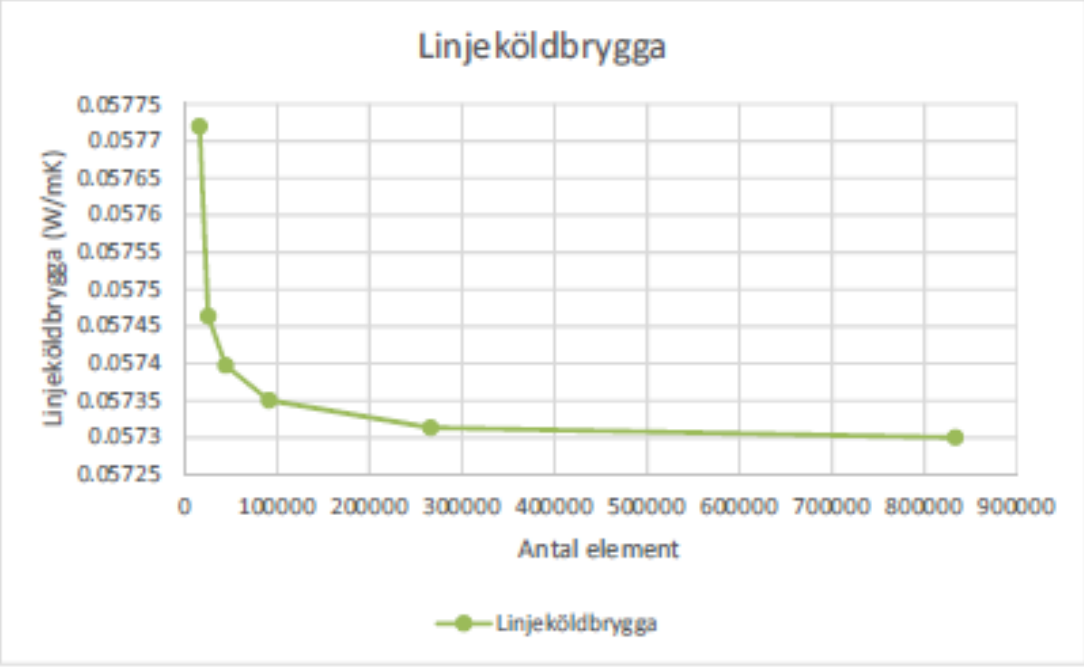

Meshindependence Ytterväggshörn 2D
medelvärde värmetransmission (W/mK)
0.31275
0.3127
0.31265
0.3126
0.31255
0.3125
0.31245
0.98
0.96
0.94
0.92
0.9
0.88
0.86
0.84
Average element quality
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
Antal element
Medelvärde
average element quality


Meshindependence Ytterväggshörn referensfall 2D
Medelvärde värmetransmission (W/mK)
0.2728
0.27275
0.2727
0.27265
0.2726
0.27255
1
0.98
0.96
0.94
0.92
0.9
0.88
0.86
0.84
0.82
Average element quality
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
Antal element
Medelvärde
average element quality


Linjeköldbrygga
Linjeköldbrygga (W/mK)
0.0400
0.0400
0.0400
0.0399
0.0399
0.0399
0.0399
0.0399
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000


Meshindependence ytterväggshörn 3D
Medelvärde värmetransmission (W/mK)
0.4185
0.418
0.4175
0.417
0.4165
0.416
0.4155
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Average element quality
0 100000 200000 300000 400000 500000 600000 700000 800000 900000
Antal element
Medelvärde
Avreage element quality


Meshindependence ytterväggshörn referensfall 3D
Medelvärde Värmetransmission (W/mK)
0.3406
0.3404
0.3402
0.34
0.3398
0.3396
0.3394
0.3392
0.339
0.3388
0.3386
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Average element quality
0 100000 200000 300000 400000 500000 600000 700000 800000
Antal element
medelvärde
Average element quality


Linjeköldbrygga
Linjeköldbrygga (W/mK)
0.05775
0.0577
0.05765
0.0576
0.05755
0.0575
0.05745
0.0574
0.05735
0.0573
0.05725
0 100000 200000 300000 400000 500000 600000 700000 800000 900000
Antal element
Linjeköldbrygga

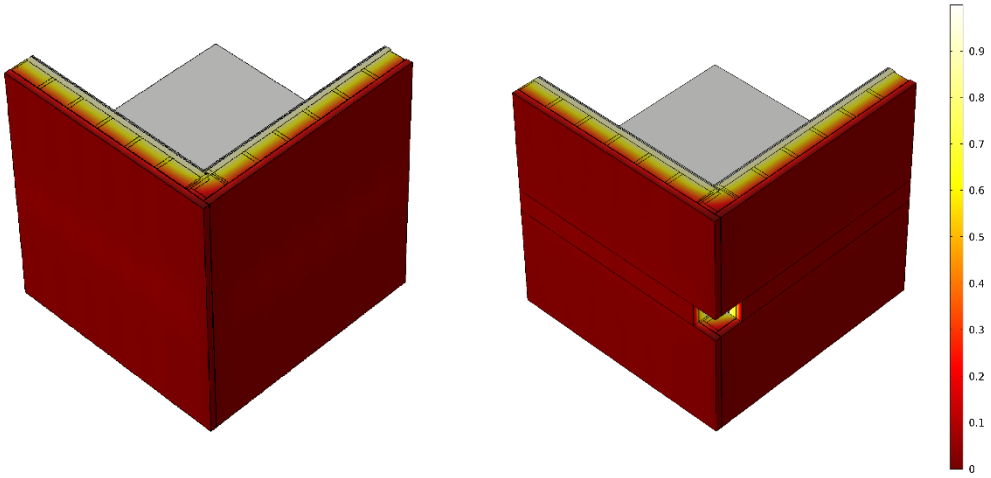
Resultatet av ytterväggshörn redovisas nedan i Tabell 2.

Tabell 2. Resultat av anslutning ytterväggshörn.

Ytterväggshörn	3D (Fine mesh)	2D (Fine mesh)	Handberäkning
U-värde referensfall	0.0947	0.1069	0.1000
Skillnad i % för U-värdesberäkning mot 3D (Fine mesh)		12.91%	5.60%
Värmetransmision genom referensfall (W/mK)	0.2509	0.2726	0.2650
Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0.3082	0.3126	
Köldbrygga (W/mK)	0.0573	0.0400	
Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	18.59%	12.79%	

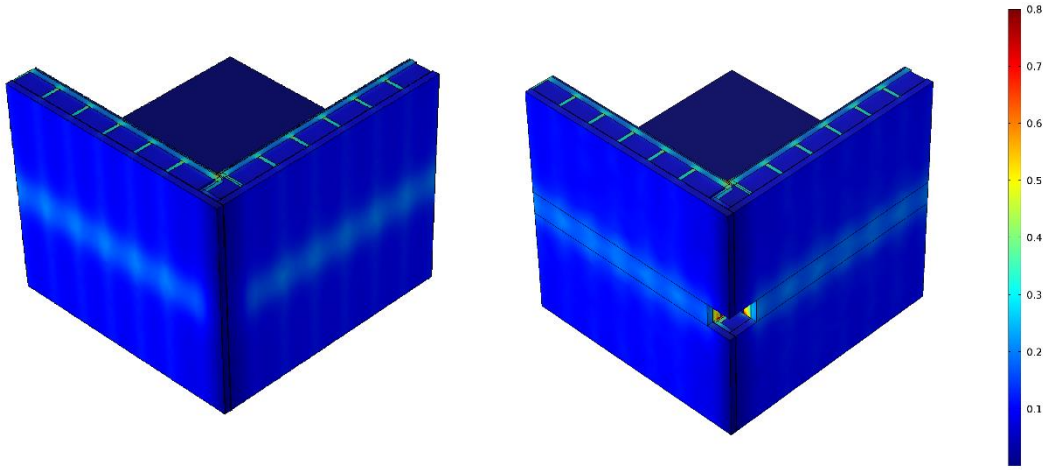
1.1.3 Ytterväggshörn möter mellanbjälklag, Punktköldbrygga

Modellen är uppbyggd av de båda fallen som redovisas komplett i kapitlen ovan. Således blir köldbryggan inte korrekt avgränsad, men poängen av punkköldbryggans inverkan blir tydlig. Punktköldbryggan skapas av anslutningen ytterväggshörn möter bjälklag. I Figur 11 redovisas temperaturfördelningen för 2D respektive 3D-modellerna för ytterväggshörn.



Figur 11. Temperaturfördelning i Celsius av 3D mellanbjälklag möter ytterväggshörn kontra referensfall.

I Figur 12 redovisas Total heat flux magnitude i W/m^2 för 2D respektive 3D-modellerna för punktköldbrygga anslutning ytterväggshörn möter bjälklag.



Figur 12. Total heat flux magnitude [W/m2] för 3D mellanbjälklag möter ytterväggshörn kontra referensfall.

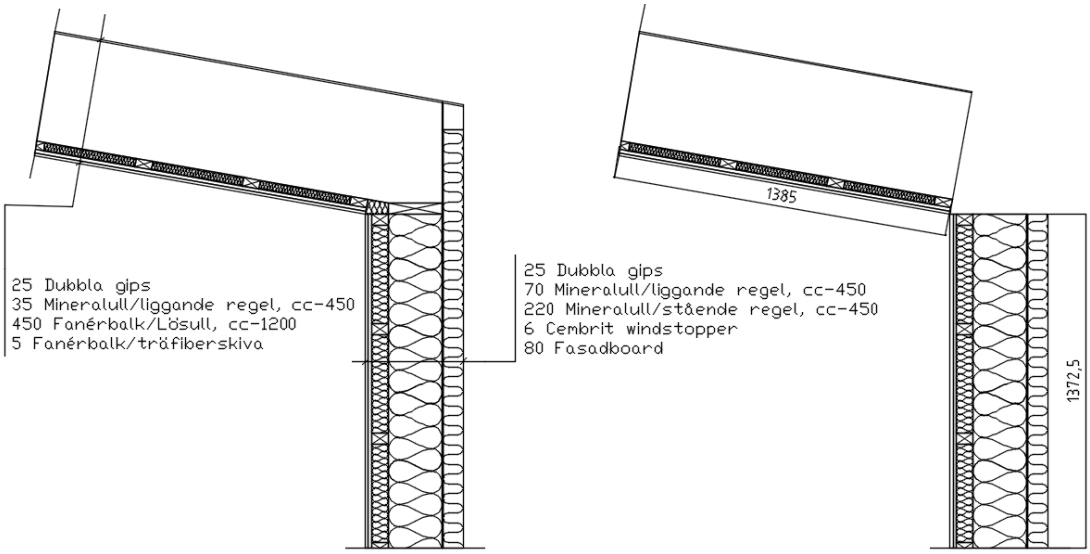
Resultatet av punktköldbrygga anslutning ytterväggshörn möter bjälklag redovisas nedan i Tabell 3.

Tabell 3. Resultat av punktköldbrygga anslutning ytterväggshörn möter bjälklag.

Ytterväggshörn-Bjälklag	3D (Normal mesh)
Värmetransmision genom verkligt fall (W/K)	2.0251
Värmetransmision genom referensfall (W/K)	2.0153
Köldbrygga (W/K)	0.0098
Andel (W/K) som transmitteras via köldbryggan	0.48%

1.1.4 Takfot möter yttervägg

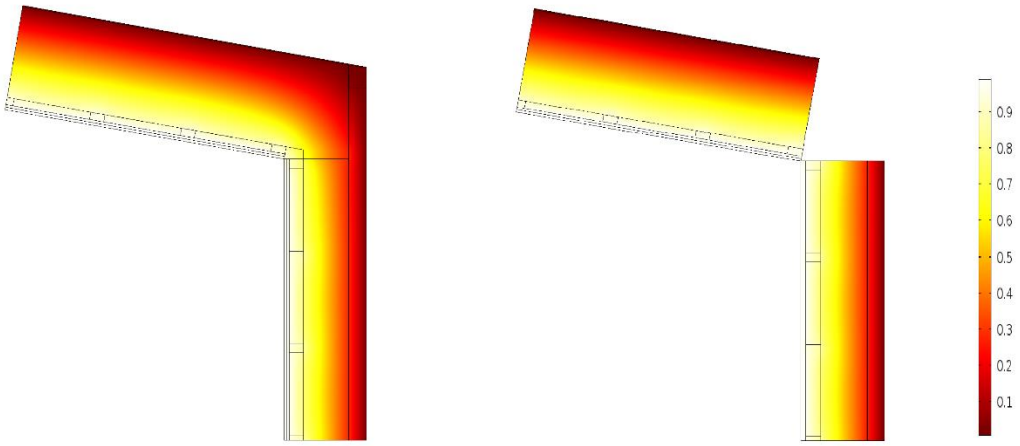
Här redovisas köldbryggan som uppstår mellan takfoten och ytterväggen.



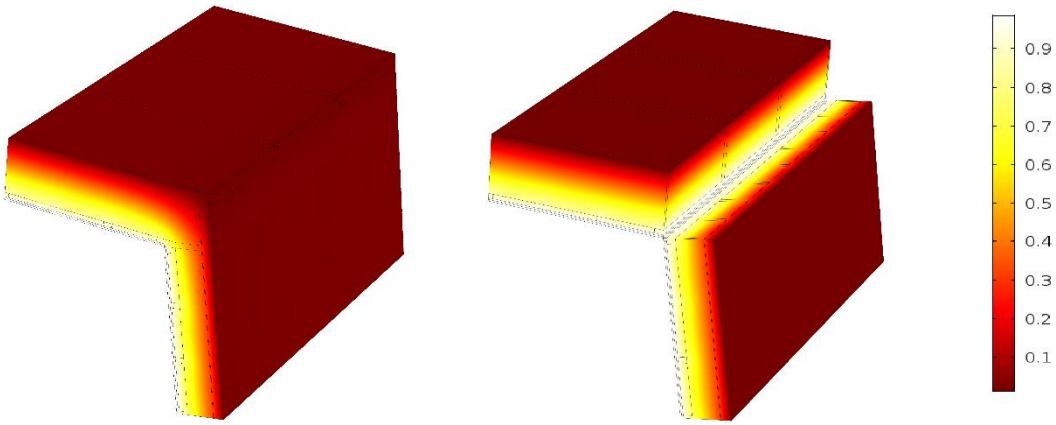
Figur 13. Ritning av takfot möter ytterväggshörn.

Nedan visas temperaturfördelningen av 2D-modellen med referensfall för takfot möter yttervägg. Förändringarna i hörnanslutningen gör att temperaturnivåkurvan kryper

närmare in mot insida vägg vilket gör att hörnet upplevs kallare. Det uppstår alltså en tydlig köldbrygga för hörnet. I Figur 14 och Figur 15 redovisas temperaturfördelningen för 2D respektive 3D-modellerna för ytterväggshörn.

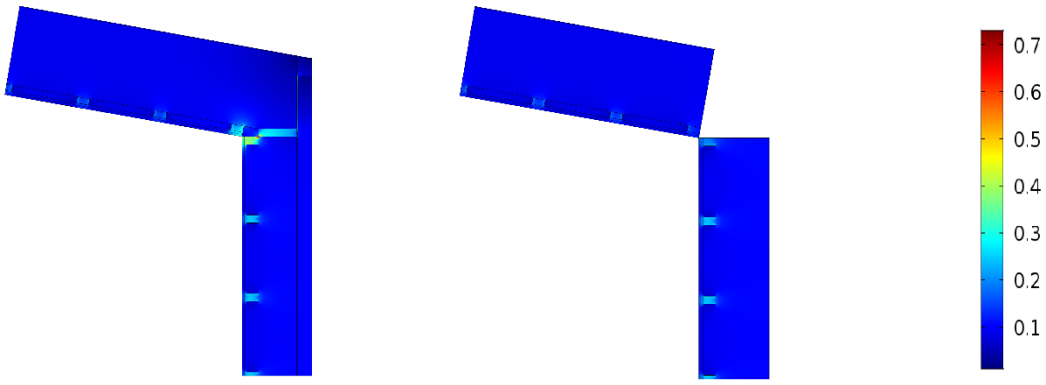


Figur 14. Temperaturfördelning i Celsius av 2D takfot möter yttervägg kontra referensfall.

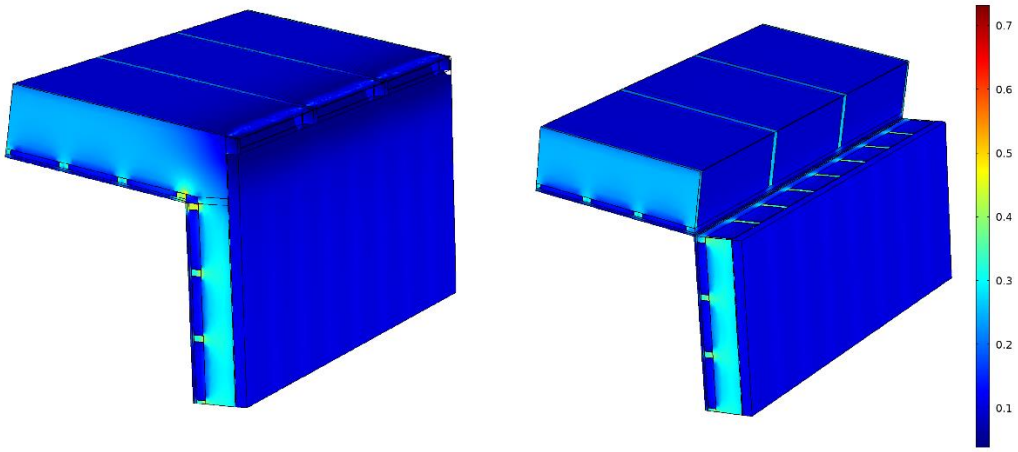


Figur 15. Temperaturfördelning i Celsius av 3D takfot möter yttervägg kontra referensfall.

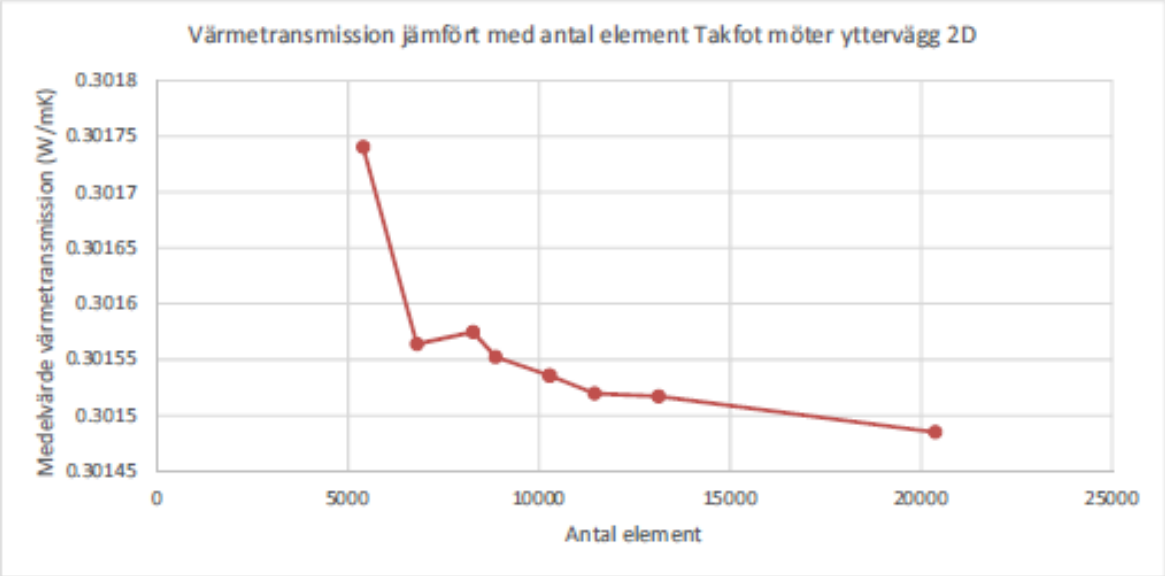
Precis som ovan uppkommer de tydligaste tredimensionella effekterna vid möten mellan byggnadsdelarna. Mötet mellan takbalk och vägg ger på samma sätt en linjeköldbrygga. I Figur 16 och Figur 17 redovisas Total heat flux magnitude i W/m^2 för 2D respektive 3D-modellerna för takfot möter yttervägg.

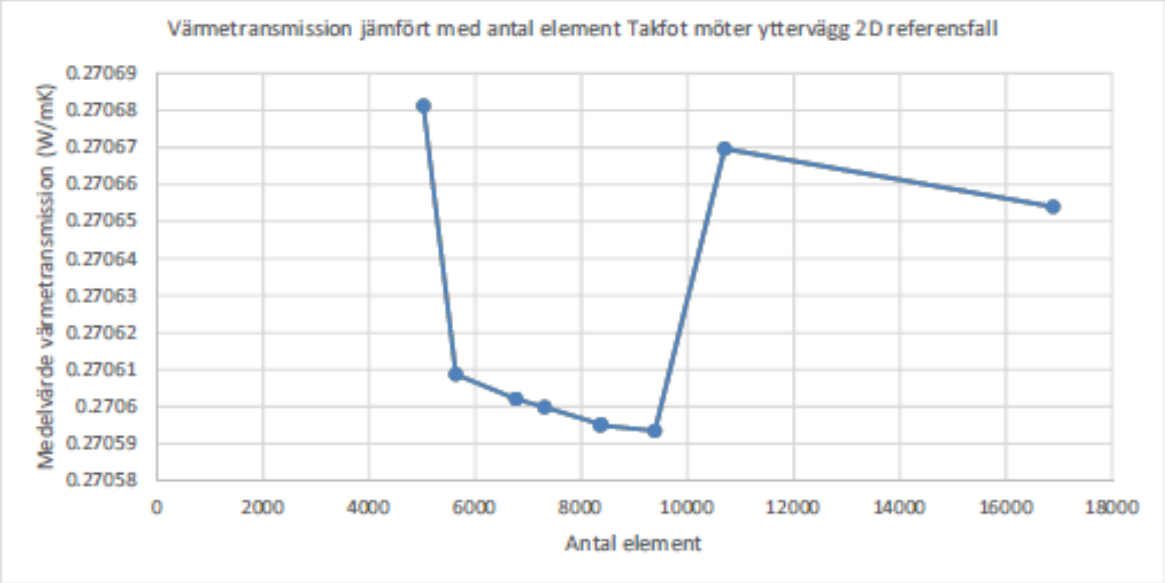


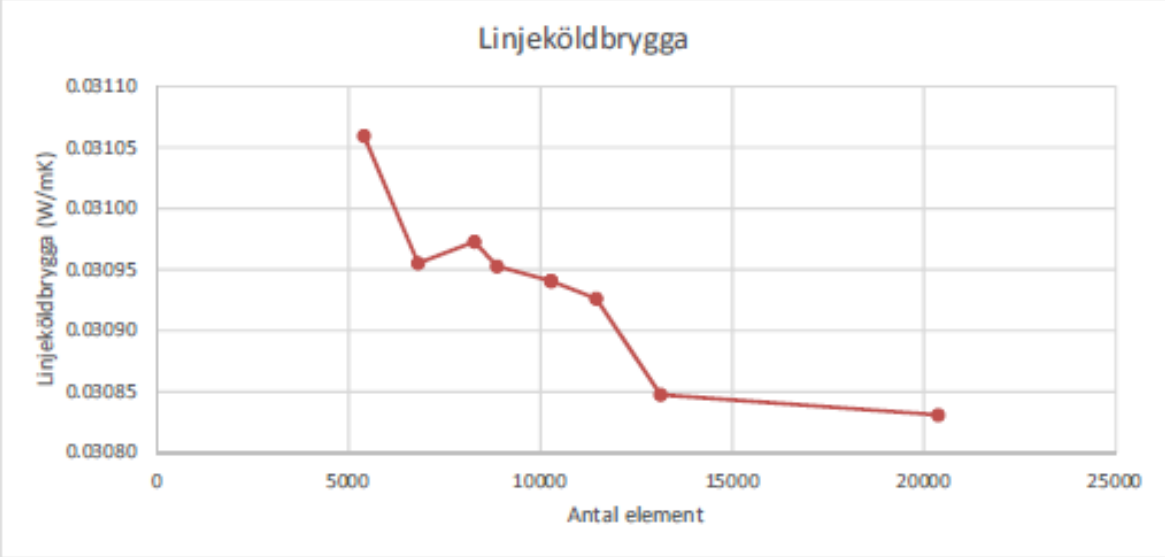
Figur 16. Total heat flux magnitude [W/m2] för 2D takstol möter yttervägg kontra referensfall.

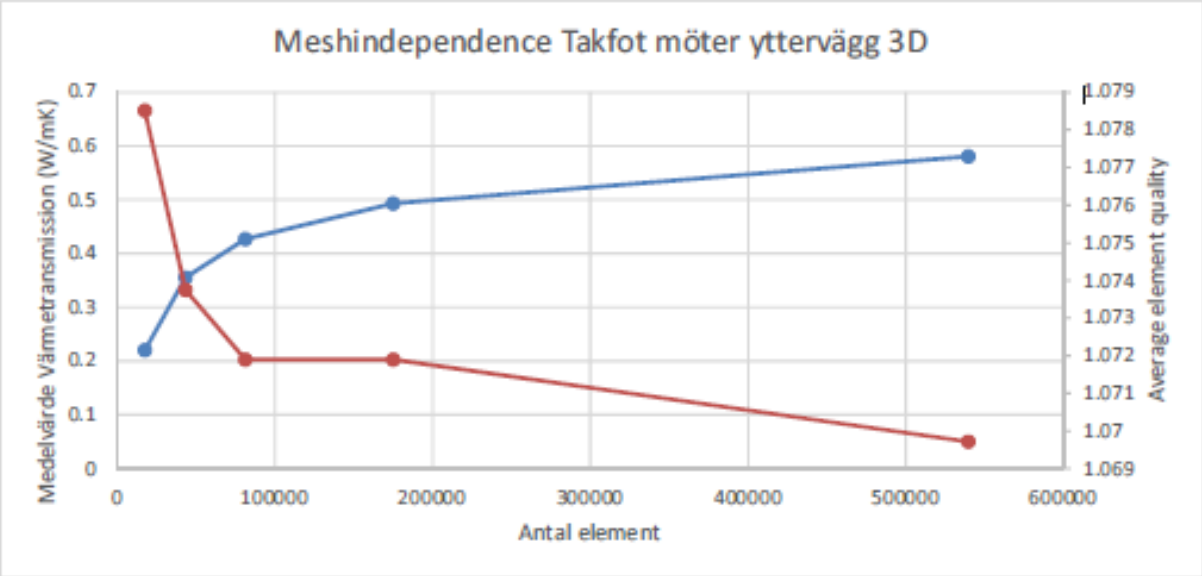


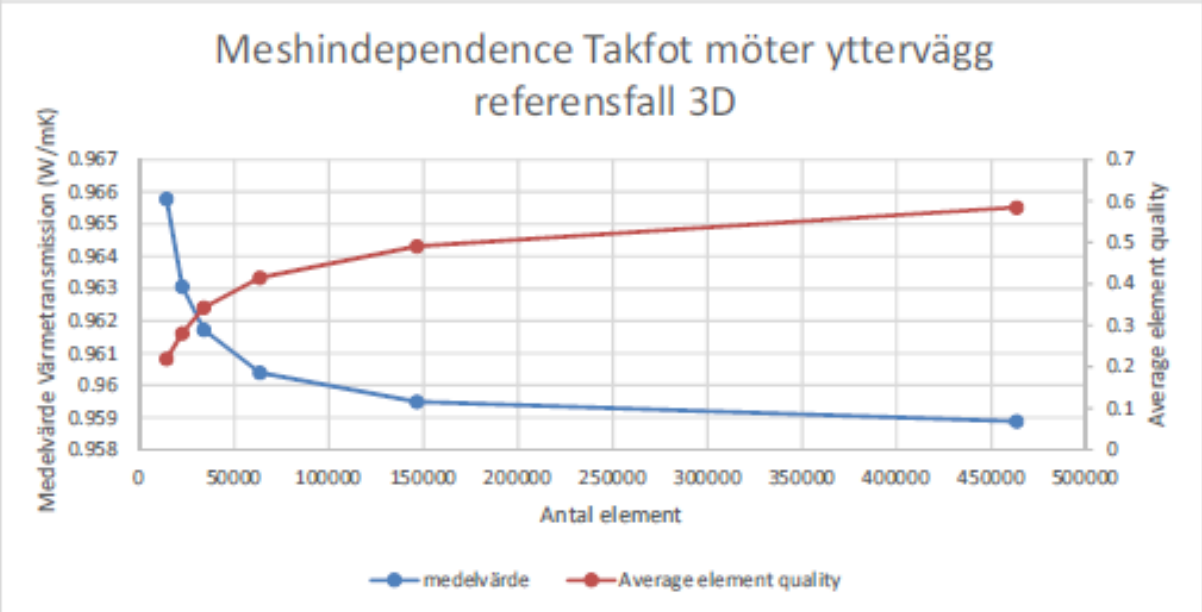
Figur 17. Total heat flux magnitude [W/m^2] för 3D takfot möter yttervägg kontra referensfall.

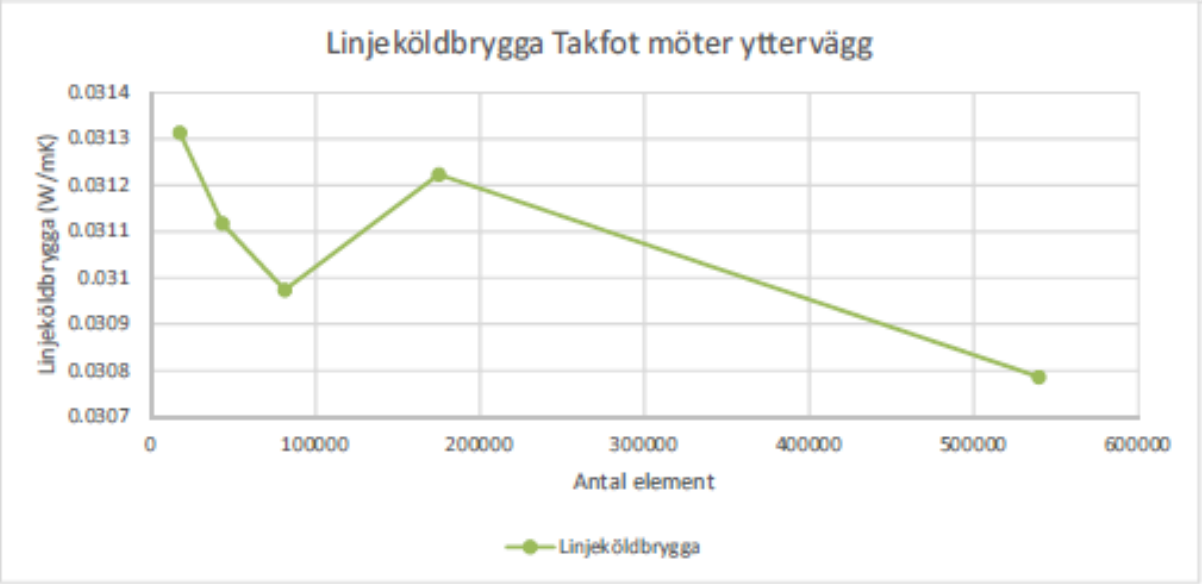

Värmetransmission jämfört med antal element Takfot möter yttervägg 2D
Medelvärde värmetransmission (W/mK)
0.3018
0.30175
0.3017
0.30165
0.3016
0.30155
0.3015
0.30145
0
5000
10000
15000
20000
25000
Antal element


Värmetransmission jämfört med antal element Takfot möter yttervägg 2D referensfall
Medelvärde värmetransmission (W/mK)
0.27069
0.27068
0.27067
0.27066
0.27065
0.27064
0.27063
0.27062
0.27061
0.2706
0.27059
0.27058
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
14000
16000
18000
Antal element


Linjeköldbrygga
Linjeköldbrygga (W/mK)
0.03110
0.03105
0.03100
0.03095
0.03090
0.03085
0.03080
0
5000
10000
15000
20000
25000
Antal element


Meshindependence Takfot möter yttervägg 3D
Medelvärde Värmetransmission (W/mK)
Average element quality
Antal element
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
1.069
1.07
1.071
1.072
1.073
1.074
1.075
1.076
1.077
1.078
1.079
0
100000
200000
300000
400000
500000
600000


Meshindependence Takfot möter yttervägg referensfall 3D
Medelvärde Värmetransmission (W/mK)
Average element quality
Antal element
0.958
0.959
0.96
0.961
0.962
0.963
0.964
0.965
0.966
0.967
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0
50000
100000
150000
200000
250000
300000
350000
400000
450000
500000
medelvärde
Average element quality


Linjeköldbrygga Takfot möter yttervägg
Linjeköldbrygga (W/mK)
Antal element
0.0307
0.0308
0.0309
0.031
0.0311
0.0312
0.0313
0.0314
0
100000
200000
300000
400000
500000
600000
Linjeköldbrygga

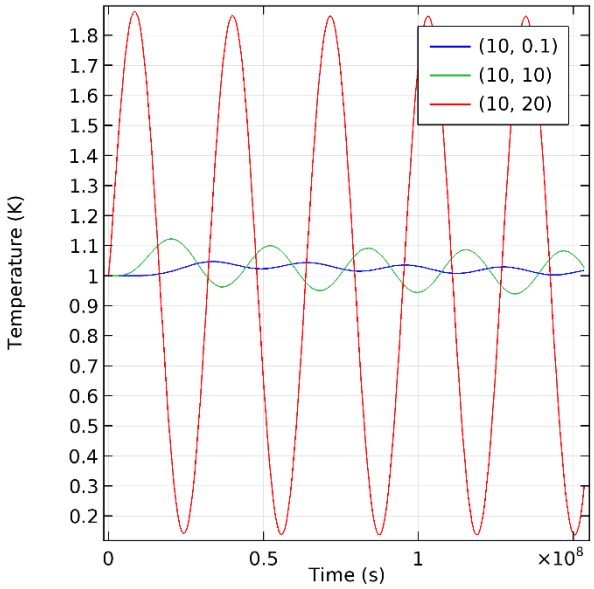
Resultatet av beräkningarna för Takfot möte yttervägg redovisas i Tabell 4 nedan.

Tabell 4. Resultat av anslutning Takfot möter yttervägg.

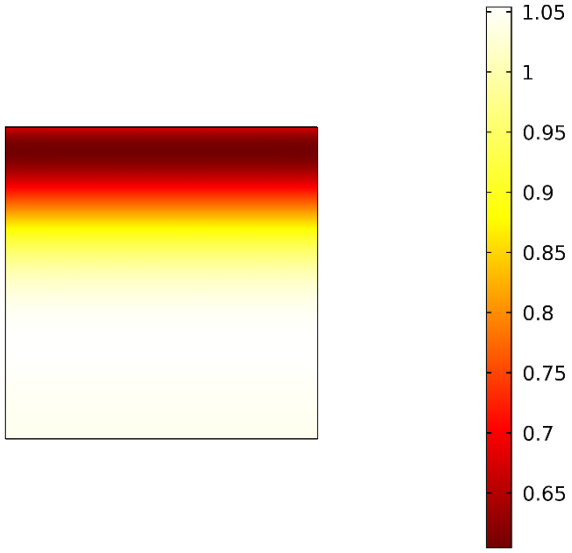
Takfot-yttervägg	3D (Fine mesh)	2D (Fine mesh)	Sammanvägd handberäkning för vägg och tak i referensfall
U-värde referensfall	0.0966	0.0981	0.0976
Skillnad i % för U-värdesberäkning mot 3D (Fine mesh)		1.59%	1.06%
Värmetransmision genom referensfall (W/mK)	0.2664	0.2706	0.2692
Värmetransmision genom verkligt fall (W/mK)	0.2971	0.3015	

1.1.5 Kantbalk

Plattans storlek har antagits för att ge ett ”smidigt” värde på B´. Plattans bredd b, är given 10 m och längden c, 13.33 m. Detta ger B´ = 8 m. 2,5 B´ är 20 meter, modellen som kontrolleras har därför givits denna storlek, med givna materialparameterar visar analysen att storleken är tillräcklig. Resultat och storlek på modellen redovisas nedan i Figur 21.
Vid kontroll av semiinfinit mark kontrolleras att den blåa kurvan är relativt konstant, alltså att den inte svänger för mycket. Detta är då ett tecken på att längst ner i marken (blåa linjen) är konstant oberoende av tiden. När storleken på marken anses semiinfinit kan en kontroll av temperaturfördelningen göras enligt Figur 19.

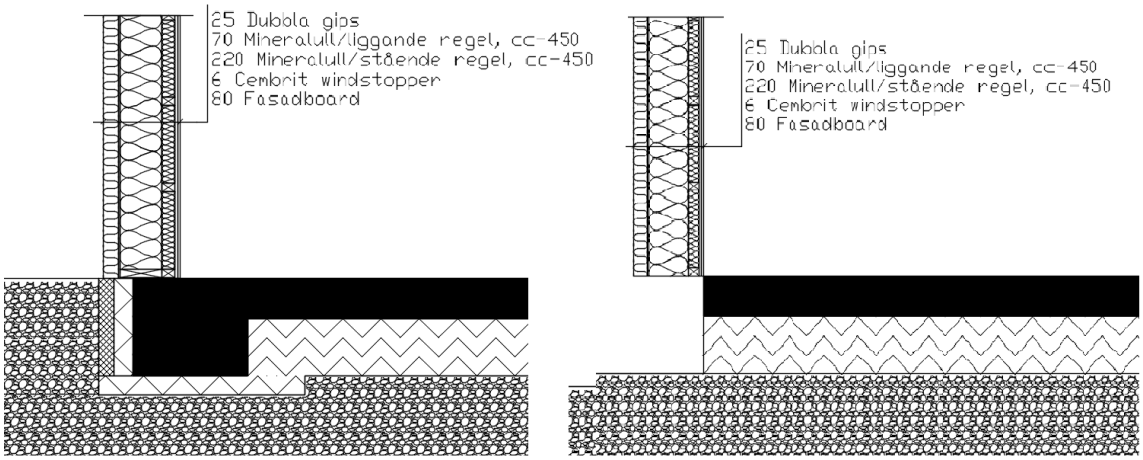


Figur 18. Temperatursvängningar över tid på olika nivåer i marken, där röd är vid ytan, grön vid 10 meters djup, blå vid 20 meters djup.



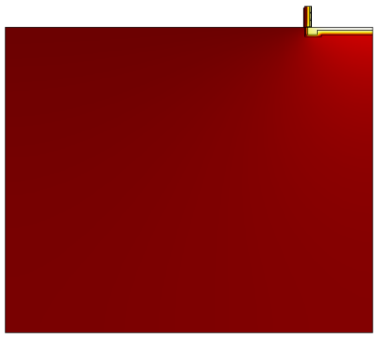
Figur 19. Temperaturfördelning i mark vid test av storlek för beräkningsmodell.

Kantbalken är uppbyggd av samma regelvägg som tidigare modeller. Och är modellerad enligt Figur 20 nedan.



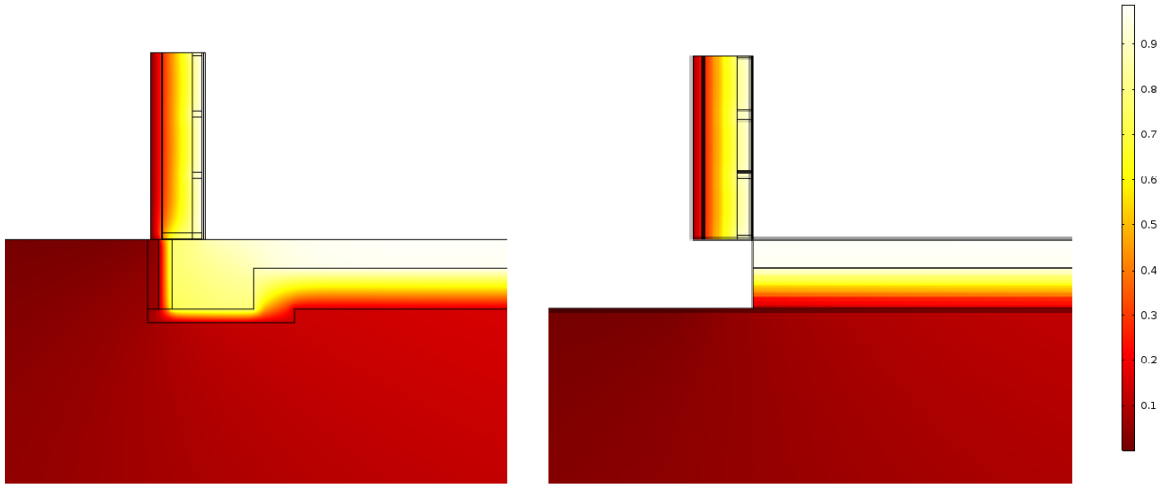
Figur 20. Ritning av kantbalk inklusive referensfall.

Om ritningen av kantbalken inklusive marken zoomas till full storlek återstår modellen enligt Figur 21 nedan för analys av kantbalk.

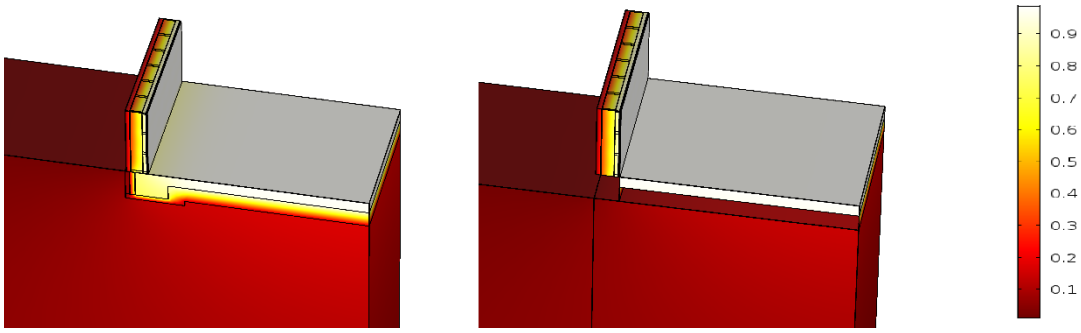


Figur 21. Storleken på modellering mark och kantbalk för kontroll av semi-infinit mark. Modellen är modellerad med temperaturfördelning i COMSOL®.

För en korrekt analys för referensfallet har marken flyttats ned för att ingen värme skall kunna gå i horisontalled. All värme transporteras då vertikalt innan det sprids i marken. I Figur 22 och Figur 23 redovisas temperaturfördelningen för 2D respektive 3D-modellerna för kantbalk.

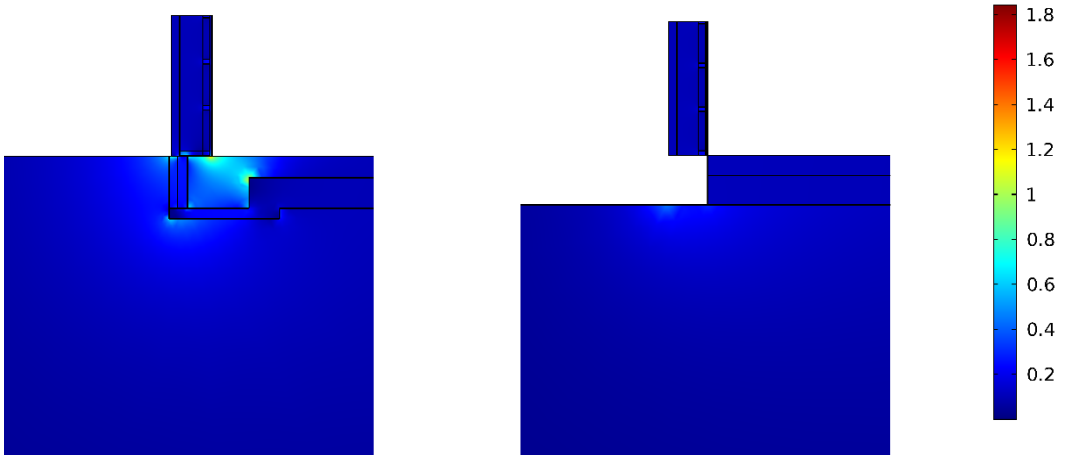


Figur 22. Temperaturfördelning i Celsius av 2D kantbalk kontra referensfall.

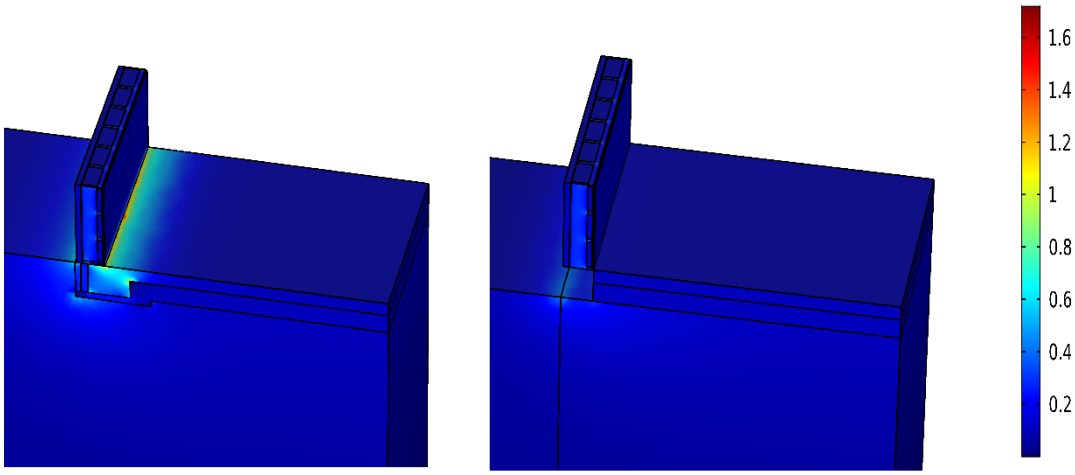


Figur 23. Temperaturfördelning i Celsius av 3D kantbalk kontra referensfall.

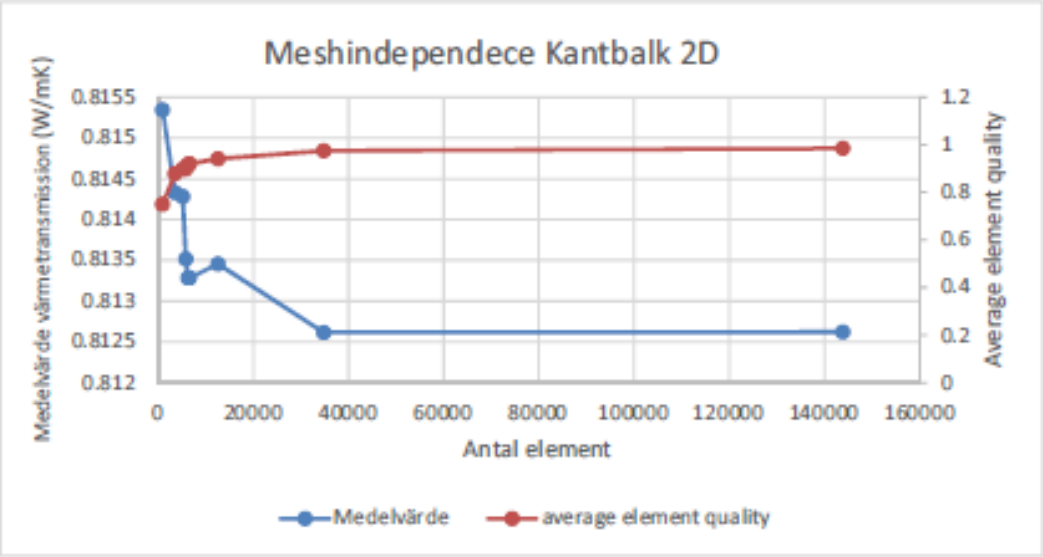
I Figur 24 och Figur 25 redovisas Total heat flux magnitude i W/m^2 för 2D respektive 3D-modellerna för kantbalk.

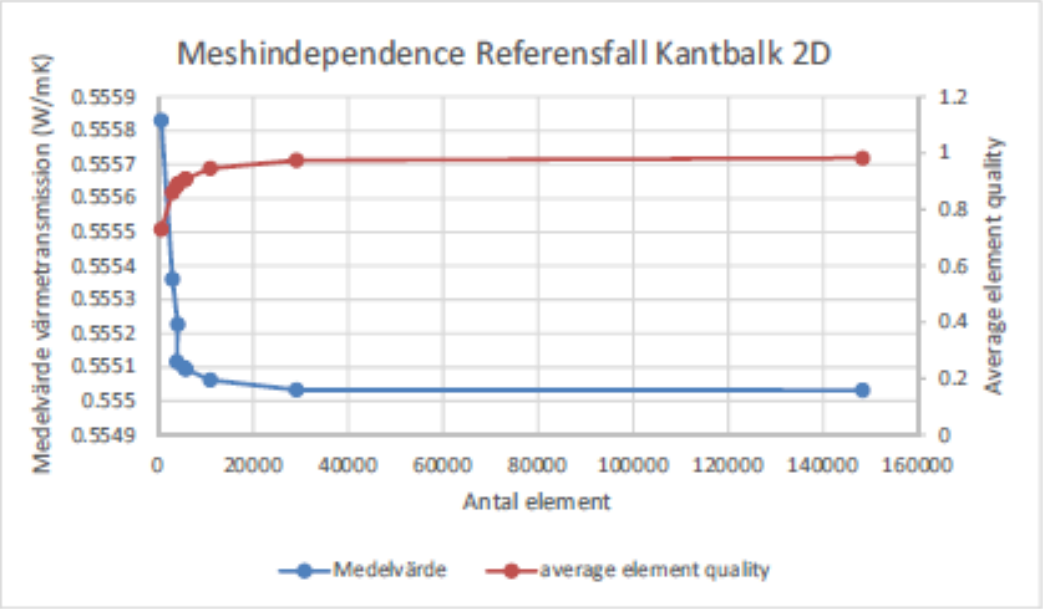


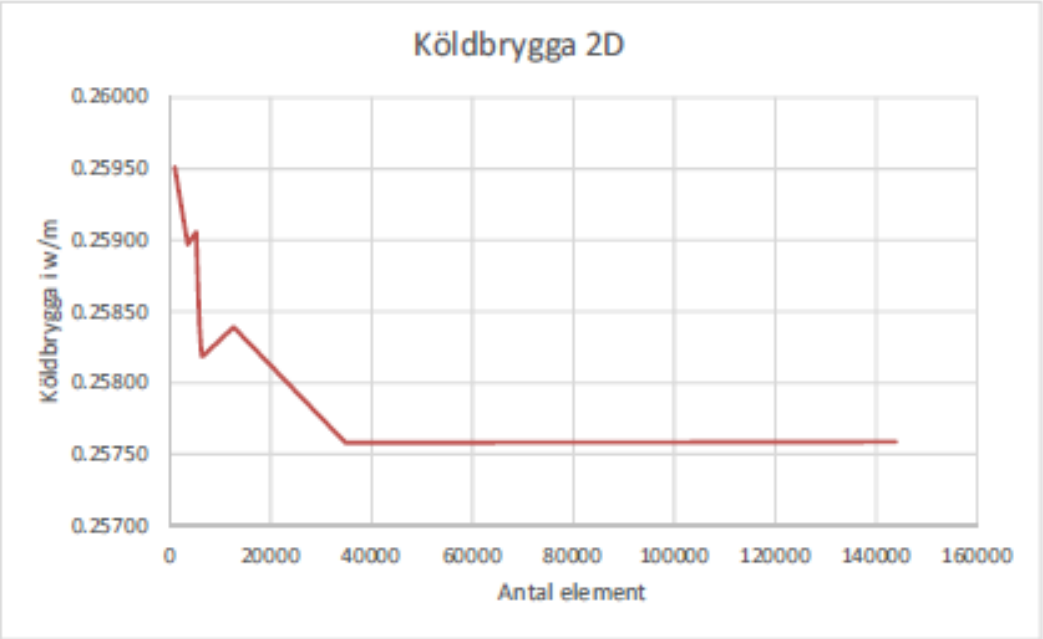
Figur 24. Total heat flux magnitude [W/m2] för 2D Kantbalk kontra referensfall.

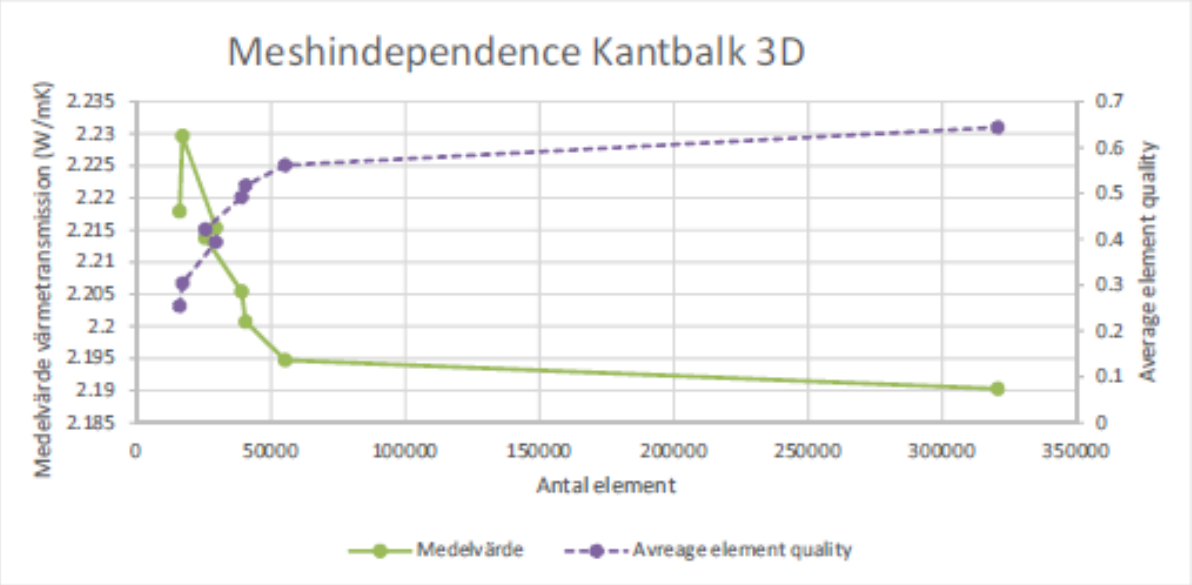


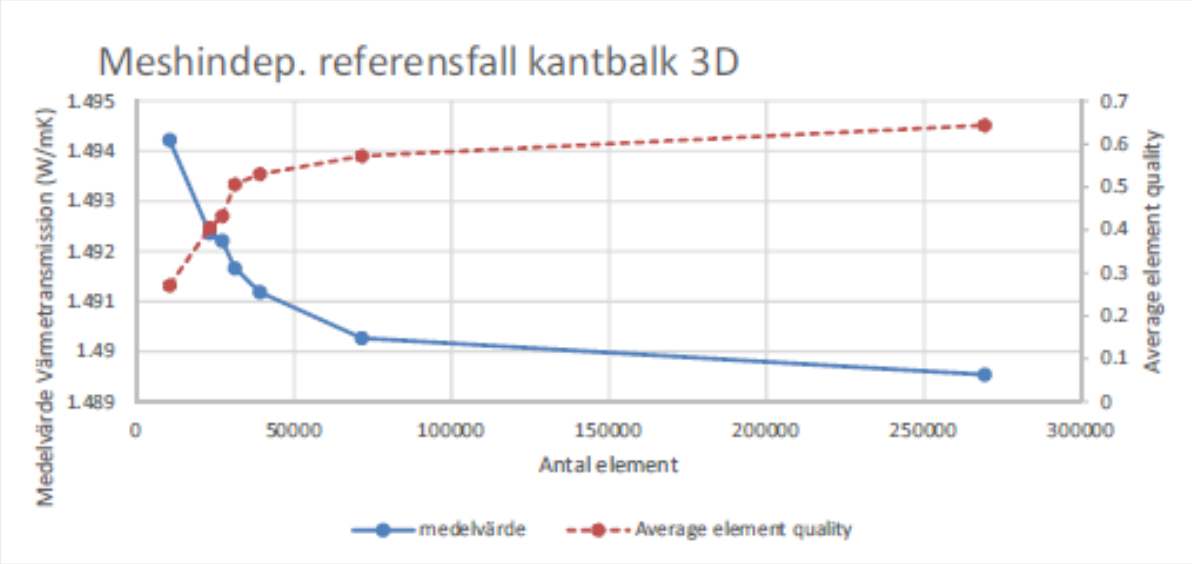
Figur 25. Total heat flux magnitude [W/m2] för 3D kantbalk kontra referensfall.

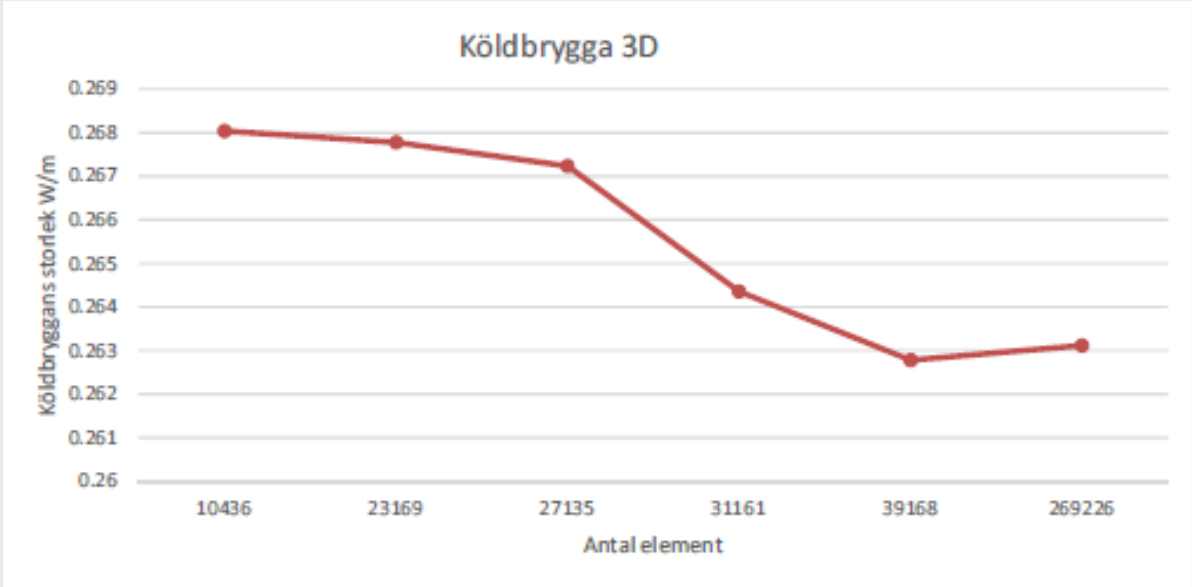

Meshindependece Kantbalk 2D
Medelvärde värmetransmission (W/mK)
0.8155
0.815
0.8145
0.814
0.8135
0.813
0.8125
0.812
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Average element quality
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
160000
Antal element
Medelvärde
average element quality


Meshindependence Referensfall Kantbalk 2D
Medelvärde värmetransmission (W/mK)
0.5559
0.5558
0.5557
0.5556
0.5555
0.5554
0.5553
0.5552
0.5551
0.555
0.5549
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Average element quality
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
160000
Antal element
Medelvärde
average element quality


Köldbrygga 2D
Köldbrygga i w/m
0.26000
0.25950
0.25900
0.25850
0.25800
0.25750
0.25700
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
140000
160000
Antal element


Meshindependence Kantbalk 3D
Medelvärde värmetransmission (W/mK)
2.235
2.23
2.225
2.22
2.215
2.21
2.205
2.2
2.195
2.19
2.185
0
50000
100000
150000
200000
250000
300000
350000
Antal element
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Average element quality
Medelvärde
Avreage element quality


Meshindep. referensfall kantbalk 3D
Medelvärde Värmetransmission (W/mK)
1.495
1.494
1.493
1.492
1.491
1.49
1.489
0
50000
100000
150000
200000
250000
300000
Antal element
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Average element quality
medelvärde
Average element quality


Köldbrygga 3D
Köldbryggans storlek W/m
0.269
0.268
0.267
0.266
0.265
0.264
0.263
0.262
0.261
0.26
10436
23169
27135
31161
39168
269226
Antal element

Resultatet av beräkningarna för kantbalk redovisas i Figur 5 nedan.

Tabell 5. Resultat av anslutning kantbalk.

Kantbalk, (platta på mark/yttervägg)	3D (Fine mesh)	2D (Fine mesh)	handberäkning
U-värde referensfall	0.0867	0.0871	0.1066
Skillnad i u-värde mot 3D-beräkning		0.51 %	22.99 %
Värmetransmision genom referensfall (W/mK)	0.5523	0.5551	
Värmetransmision genom verkligtfall (W/mK)	0.8151	0.8133	
Köldbrygga (W/mK)	0.2628	0.2582	
Andel (W/mK) som transmitteras via köldbryggan	32.24 %	31.75 %	