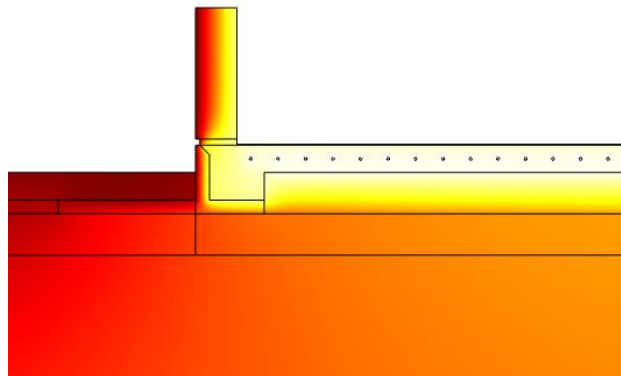


Undersökning av värmeförluster genom kant- balk vid användning av golvvärme

En simuleringsundersökning i COMSOL Multiphysics

Linus Dahlin, Marcus Hedman

2018



Examensarbete, Grundnivå (högskoleexamen), 15 hp
Byggnadsteknik
Byggnadsingenjör

Handledare: Jan Akander
Examinator: Göran Hed

Förord

Denna rapport är resultatet av ett fullföljt examensarbete som omfattar 15 högskolepoäng och avslutar en treårig byggnadsingenjörsutbildning vid Högskolan i Gävle.

Vi vill främst tacka vår handledare Jan Akander, Universitetslektor vid Högskolan i Gävle, för allt stöd i arbetet. Tack för engagemanget och det brinnande intresset att hjälpa till och vägleda oss genom arbetets fortgång.

Vi vill även rikta tacksamhet till dem som hjälpt till på något sätt med information eller diskussioner.

Gävle, juni 2018

Sammanfattning

I Sverige ställs allt högre krav på nya byggnader genom bestämmelser och lagar som påverkar energianvändningen. Byggnader kan värmas upp med hjälp av olika typer av distributionssystem såsom radiatorer och golvvärme. Värmebehovet hos byggnaden baseras på hur mycket värmeenergi som behövs för att uppnå termisk komfort. För att begränsa energianvändningen används isolering i syfte att minimera värmeförlusterna genom byggnadens klimatskärm.

Denna undersökning syftar till att undersöka förluster som sker genom kantbalken vid användning av vattenburet golvvärmesystem och hur dessa förluster påverkas då grundkonstruktionen tilläggsisoleras på olika sätt. Kantbalken är den förstärkta del som finns under markplattan/platta på mark, tar upp krafter från bärande väggar och finns efter sidorna på byggnaden. Golvvärme är en uppvärmningsteknik där slingor placeras i grundkonstruktionen och förser byggnader med dess värmebehov. Golvvärmesystem installeras på olika sätt beroende på byggnaders förutsättningar och är ett energieffektivt uppvärmningssätt i kombination med värmepump.

Undersökningen påbörjades genom att skapa en förenklad modell som behandlar en 2-dimensionell kantbalksutformning i COMSOL Multiphysics, som är ett program för modellering där statiska och dynamiska simuleringar genomförs i modeller med hjälp av finita-elementmetoden.

Fyra modeller skapades med två olika CC-mått (centrumavstånd) och två olika golvmaterial. Därefter skapades tre fall med förbättrande åtgärder för att öka kantbalkens isolerförmåga. Dynamiska simuleringar genomfördes och hade tidsintervallet 365 dagar med varierande utetemperatur. När utetemperaturen varierade var effektbehovet hos golvvärmen olika vilket ledde till att golvvärmetemperaturen justerades efter utetemperaturen för att upprätthålla samma temperatur på golvytan.

Resultaten visar att kantbalken står för cirka 50 % av markkonstruktionsförlusterna med installerat L-element. Vid komplettering av konstruktionen med två fall av tilläggsisolering framkom inga större förändringar i resultaten. Genom att byta ut L-elementet till ett U-element minskar dock värmeförlusterna genom kantbalken till ca 30 %. Markkonstruktionsförluster är de förluster som överförs från byggnaden till närliggande mark.

Nyckelord: COMSOL, Energianvändning, Golvvärmesystem, Kantbalk, Värmebehov

Abstract

Through laws and regulations in Sweden, increasing demands regarding energy use are affecting new buildings. A building achieving thermal comfort is attaining its thermal needs and can be done so through several types of distribution systems such as radiators and underfloor heating. Insulation is used to limit the amount of energy lost through the building's envelope whilst keeping up with the thermal needs.

This study is meant to examine the thermal leakage around the edge beam installation when using a waterborne underfloor heating system and different sets of insulation are installed in the ground-related construction. The edge beam is the reinforced part located around the perimeter of the building absorbing forces from supporting walls.

The study started with creating and using a simplified model in COMSOL Multiphysics to look at a two-dimensional edge beam formation. COMSOL Multiphysics is a software used for modeling different static and dynamic simulations via the finite element method.

Four models were created using two different CC-dimensions (center to center distance) and two different floor materials. After this, three cases were created with improved circumstances regarding the ability to isolate heat around the edge beam. Dynamic simulations were made and calculated a year's worth of varying outdoor temperatures. When the outdoor temperature changes, the requirements of the underfloor heating output also change which leads to its temperature adapting due to the outdoor temperature.

The results indicate the edge beam related heat losses make up of about 50 % of the ground-related construction losses in the model. When completing the design with two instances of additional insulation, no major changes were found in the results. However, replacing the L-shaped insulation around the edge beam with a U-shaped insulation reduces heat losses through the edge beam to about 30 %. Ground-related construction losses are the losses transferred from the building to adjacent ground.

Key words: COMSOL, Edge beam, Energy usage, Thermal needs, Underfloor heating.

Förklaringar

Beteckning	Beskrivning	Enhet
U	Värmeövergångskoefficient – Värmeflöde genom byggnadsdel	W/m ² K
λ	Värmeledningsförmåga	W/mK
R	Värmemotstånd - Byggnadsdels isolerförmåga	m ² K/W
ρ	Densitet - Massa per volym	kg/m ³
c	Specifik värmekapacitet - Värmelagringsförmåga	J/(kgK)
R _{si} , R _{se}	Värmeövergångsmotstånd - Från luft till material samt material till luft.	m ² K/W
P	Värmeflöde - Energi per tidsenhet	W
DVUT	Dimensionerande vinter utetemperatur	°C

Innehållsförteckning

Förord	iii
Sammanfattning	v
Abstract	vii
Förklaringar	ix
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.1.1 Sveriges energi	1
1.1.2 Globala miljömål	2
1.1.3 Grundkonstruktion	2
1.1.4 Golvvärme	3
1.1.5 Värmepump i kombination med golvvärme	4
1.1.6 Rekommenderad värmeisoleringsjocklek	5
1.2 Syfte	6
1.3 Avgränsning	6
2 Teori	7
2.1 Byggtekniska storheter	7
2.1.1 Värmeegenomgångskoefficient, U	7
2.1.2 Värmeledning, λ	7
2.1.3 Värmemotstånd, R	7
2.1.4 Densitet, ρ	8
2.1.5 Specifik värmekapacitet, c	8
2.1.6 Värmeledning, P	8
2.1.7 Värmeövergångskoefficient, α	8
2.1.8 Dimensionerande vinterutetemperatur, $DVUT$	8
2.2 Byggnadstekniska problem	9
2.2.1 Tjäle	9
2.2.2 Köldbryggor	9
2.2.3 Termisk komfort	9
2.3 Varierande temperaturer	10
2.3.1 Utetemperatur	10
2.3.2 Golvvärmemetemperatur	10
3 Metod	11

3.1	Simulering	11
3.1.1	COMSOL	12
4	Process och resultat	13
4.1	Process	13
4.1.4	Simulering	13
4.2	Resultat	18
4.2.1	Statiska simuleringar	18
4.2.2	Dynamiska simuleringar	19
4.2.3	Tilläggsisolering	20
5	Analys & Diskussion	22
5.1	Analys	22
5.2	Diskussion	22
6	Slutsatser	25
	Referenser	26
	Bilaga A - Litteratursökning	A1
	Bilaga B – Parametrar i COMSOL	B1

1 Introduktion

Boverket (2017) och andra myndigheters krav på byggnader blir allt högre och behandlar bland annat energieffektivisering som korrelerar till global hållbarhet och människans miljöavtryck på jorden. För att få rätt termisk komfort i byggnader krävs ett distributionssystem för att fördela värmen i byggnader, exempelvis via radiatorer eller golvvärme.

Moderna byggnader är välisolerade och fokus ligger på att sänka U-värden hos olika byggnadsdelar såsom fönster, dörrar, väggar och tak. Hur är det egentligen med isolering runt och under platta på mark? I dagsläget finns det få riktlinjer som beskriver hur mycket det ska isoleras då varje specifik byggnad har unika behov. Runt platta på mark finns en kantbalk och den isoleras ofta med färdiga isolerelement.

Om golvvärme är valt som värmekälla i en byggnad blir markplattan betydligt varmare än vid installerade radiatorer i byggnaden. Vid golvvärme ställs således högre krav på isoleringen av markplattan och kantbalken. Hur mycket isolering är rimligt att använda runt kantbalken ur ett värmeförlustperspektiv? Räcker de färdiga isolerelementen eller behövs mer isolering?

1.1 Bakgrund

1.1.1 Sveriges energi

Sveriges energianvändning delas in i tre olika användningsområden: industrisektorn, transportsektorn samt bostäder- och servicesektorn. Den sistnämnda utgör ca 40 % av den totala energianvändningen i Sverige. Vidare består sektorerna av delsektorer och under bostäder- och servicesektorn finns bland annat *hushåll*, som under 2015 stod för 14 TWh elvärmeanvändning vilket motsvarar ca 11,5 % av Sveriges totala elanvändning under året. I denna summa är direktverkande el och elanvändning för drift av eventuell värmepanna (som är installerad i ca 50 % av Sveriges bestånd av småhus) inkluderat (Energimyndigheten, 2017).

Energimyndigheten (2017) skriver att vatten- och kärnkraftverk tillsammans står för ca 80 % av Sveriges elproduktion. De resterande produktionsformerna är vindkraft, solkraft och konventionell värmekraft. Se Fig. 1.

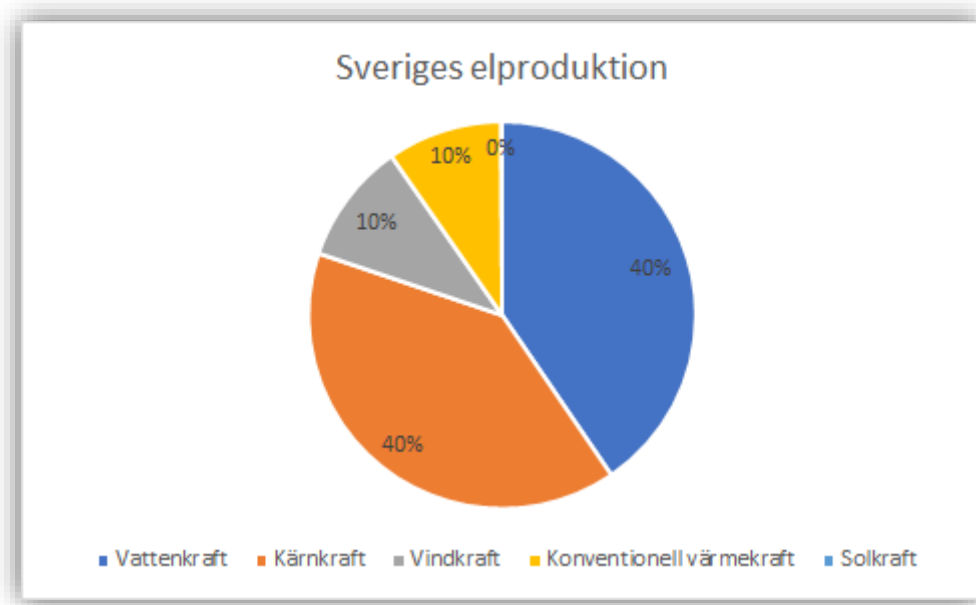


Fig. 1. Fördelning av Sveriges elproduktion. (Energimyndigheten, 2017).

1.1.2 Globala miljömål

De globala målen är framtagna av Förenta nationernas 193 medlemsstater och syftar till att uppnå bättre levnadsvillkor genom universella mål och gemensamt genomförande. Agenda 2030 är en handlingsplan för att underlätta i arbetet att nå de globala målen fram till år 2030. Dessa består av 17 mål och 169 delmål som behandlar hållbar utveckling och är integrerade mellan sociala-, ekonomiska- och miljömässiga dimensioner (Förenta Nationerna [FN], 2015).

1.1.3 Grundkonstruktion

Grundkonstruktionen för byggnader ser olika ut beroende på förutsättningarna som finns i varje enskilt fall, speciellt vad gäller markförhållanden. Platta på mark kan användas vid de flesta markförhållanden. Om marken har hög hållfasthet, schaktas den ovanpåliggande matjorden bort och plattan får vila på undergrunden. Om marken har låg hållfasthet kan pålar eller plintar användas för att undvika sättningar (TräGuiden, 2003).

Platta på mark består dels av en platta och dels av förstärkta delar som är bärande. De förstärkta delarna finns utefter sidorna på byggnaden och kallas för kantbalk. Kantbalken tar upp krafter från bärande ytterväggar. Förstärkta delar kan även finnas i mitten av plattan för att ta upp krafter från bärande innerväggar. Vid behov placeras pålar eller plintar under de förstärkta delarna (TräGuiden, 2003).

Plattan består av betong som är armerad och gjuts direkt på arbetsplatsen. För att konstruktionen ska fungera väl krävs att den värmeisolerar på rätt sätt. Värmeisolering används både under plattan och på sidan av kantbalken. Värmeisoleringen under plattan består ofta av cellplast medan kantbalksisoleringen utgörs av färdiga element i olika utformningar (TräGuiden, 2003). Se Fig. 2 för L-element och Fig. 3 för U-element.

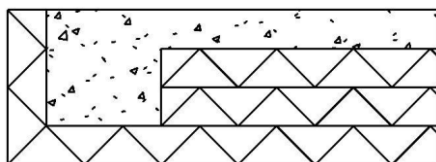


Fig. 2. Grundkonstruktion med L-element

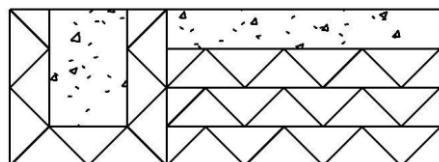


Fig. 3. Grundkonstruktion med U-element

1.1.4 Golvvärme

Golvvärme är ett uppvärmningssätt som fungerar genom att golvet värms med värmeledningar för att motsvara det totala värmebehovet som finns i byggnaden. Det finns många olika tekniker att installera golvvärme och det är viktigt att det utförs på rätt sätt för att undvika fuktproblem och energiförluster. Golvvärmesystem finns i tre olika utföranden: vattenburet, luftburet och via direktverkande el. Med vatten- och luftburet system finns möjligheter till kombination med värmepump, solfångare, pelletspanna m.m. Vattenburen golvvärme kan läggas med olika rördimensioner och CC-mått (avstånd mellan rörens mittpunkt) och framledningstemperaturen kan variera beroende på värmebehovet (Boverket, 2002). Figur 4 visar ett exempel på hur golvvärme kan placeras i platta på mark.

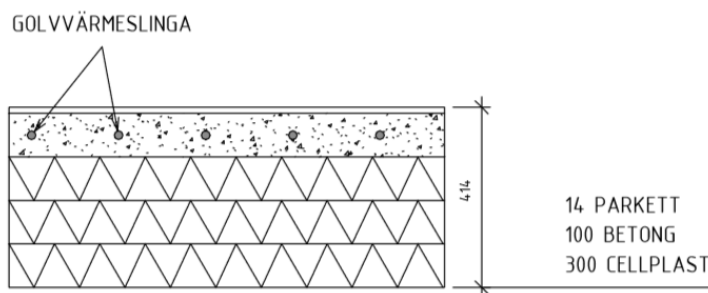


Fig. 4. Grundkonstruktion med golvvärmeslinga i platta på mark

I ett hus som använder golvvärme är värmeförlusterna till den underliggande marken större än med andra uppvärmningsmetoder då markplattan aktivt är uppvärmd. Därför krävs mer värmeisolering under byggnader med golvvärme än byggnader med andra uppvärmningstekniker för att undvika högre värmeförluster. Boverket (2002) har som tumregel att ha minst 250 mm isolering under plattan på mark. Beroende på vilket golvmaterial som används kan golvvärmens effekt behövas anpassas.

Exempelvis har klinker högre värmekonduktivitet än parkettgolv vilket betyder att högre effekt krävs vid installerat trägolv än hos klinker för att erfordra samma yttemperatur. Beroende på djupet på slingplanet och ytmaterial på golvet kan det uppstå en varmrandighet på golvet vilket betyder att det blir varmare där slingorna ligger och kallare mellan slingorna. Detta kan motverkas genom att använda fördelningsplåtar som sprider värmen på ett jämnare sätt till hela golvytan (Boverket, 2002), se Fig. 5.

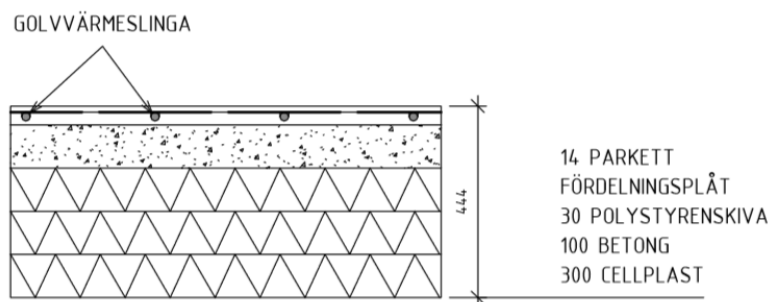


Fig. 5. Grundkonstruktion med golvvärmeslinga ovanpå platta på mark

Om inte tillräcklig isolering placeras under plattan kan fuktproblem uppstå då marken blir varmare än inomhustemperaturen och en omvänd fukttransport genom plattan uppstår på grund av att fukt, liksom värme, rör sig från högre koncentrationer till lägre och den relativa ånghalten, RH, alltid antas vara 100 % i marken (Sandin, 2010).

Fördelar med golvvärme är att det blir en jämn värmefördelning i hela huset och att inga radiatorer eller rör är synliga. En nackdel är att golvvärmen inte avger tillräcklig värme för att motverka kallras vid större fönsterpartier. Det kan till viss del motverkas genom att lägga golvvärmeslingor tätare vid dessa partier eller helt genom att installera lokala radiatorer. Golvvärme är även ett trögt system vilket leder till att det är en viss tidsfördröjning när större temperaturskillnader uppstår utomhus (Boverket, 2002).

1.1.5 Värmepump i kombination med golvvärme

Olika typer av värmepumpar existerar på marknaden och enligt Energimyndigheten (2006) fungerar de genom att lagrad energi utvinns ur berg, jord, vatten eller luft. De har hög värmefaktor vilket är förhållandet mellan tillförd energi, för att driva värmepumpen, och avgiven energi till byggnaden. Detta resulterar i lägre driftkostnader jämfört med direktverkande el. I de flesta fall (bortsett från luft-luftvärmepump) fungerar systemen genom att en kollektorslang placeras i materialet, exempelvis berg eller jord, och är fylld med en frostskyddsvätska som absorberar värme. Den uppvärmda vätskan transporteras till värmepumpen där, genom material med

hög värmekonduktivitet, värmen överförs till det befintliga distributionssystemet i byggnaden (Energimyndigheten, 2006).

Uteluftvärmepumpar finns i två utföranden: luft-luftvärmepump och luft-vattenvärmepump. I det förstnämnda systemet överförs värmeenergin som finns i utomhusluften direkt till inomhusklimatet och sprids med hjälp av en fläkt. Detta system värmer endast upp inomhusluften och kan inte användas till uppvärmning av tappvarmvatten. Luft-vattenvärmepump fungerar likt de ovan nämnda systemen där värmeenergin tas upp från valt medium (i detta fall luft) och överför energin till det vattenburna värmesystemet i byggnaden som i sin tur värmer upp inomhusklimatet och tappvarmvattnet (Energimyndigheten, 2006).

Enligt Energirådgivningen (2018a) uppnår värmepumpen optimal drift vid låg temperatur hos vattnet i distributionssystemet vilket resulterar i att radiatorer som distribuerar värmen till byggnaden behöver ha stor yta. Således fyller golvvärme denna funktion väl då hela golvytan med installerade golvvärmeslingor agerar radiator. Boverket (2002) skriver att verkningsgraden hos värmepumpen gynnas då temperaturen hos vattnet i golvvärmeslingan kan vara låg och att kombinationen mellan värmepump och golvvärme är en bra lösning.

1.1.6 Rekommenderad värmeisoleringstjocklek

Golvbranschens våtrumskontroll, GVK, har som tumregel att det minst ska vara 300 mm isolering under golvvärmeslingor under platta på mark.

<https://www.gvk.se/branschregler/golv/golvvarme/>

Boverket (2002) säger att en tumregel för isolering under platta på mark vid golvvärmeinstallation är 250 mm.

LK-systems rekommenderar att isolertjocklekar ska vara mellan 200–300 mm.

<http://www.lksystems.se/sv/support/faq-golvvarme/>

Uponor rekommenderar att isolera med 200 mm isolering under platta på mark vid golvvärmeinstallation. <https://www.uponor.se/vvs/kundtjanst/faq>

För sammanställning av ovanstående rekommenderade värmeisoleringstjocklekar, se Tab. 1. Inga rekommendationer om kantbalksisolering förekommer i samband med rekommendationerna om isolertjocklek under plattan.

Tab. 1. Sammanställning av isolertjocklek under platta på mark.

Organisation	Isolertjocklek
GVK	300 mm
BBR	250 mm
LK-systems	200–300 mm
Uponor	200 mm

1.2 Syfte

Syftet med undersökningen är att studera värmeförluster som sker genom kantbalken vid användning av golvvärme samt att undersöka olika förbättringsåtgärder för att sänka värmeförlusterna.

- Hur stora värmeförluster sker genom kantbalken med L-element?
- Hur påverkas kantbalksförlusterna av avstånden mellan slingorna, golvmaterial samt alternativa isoleringstekniker?

Målet med undersökningen är att bestämma hur stora värmeförlusterna är hos kantbalken under olika förutsättningar och ta fram rimliga förbättringsförslag.

1.3 Avgränsning

Rådande avgränsningar är att arbetet behandlar en 2-dimensionell modell med förenklade och standardiserade byggnadsdelar för byggnader i Sverige. Utöver detta behandlar inte undersökningen fuktrelaterad problematik.

2 Teori

I detta kapitel presenteras teoretisk information som ligger till grund för undersökningen.

2.1 Byggtekniska storheter

2.1.1 Värmeegenomgångskoefficient, U

Sandin (2010) beskriver att vid beräkningar av en byggnadsdel används ofta begreppet värmeegenomgångskoefficient även kallat U-värde. U-värdet definieras som den värmemängd som passerar per tidsenhet genom en ytenhet av konstruktionen när skillnaden i temperatur på båda sidor är en grad Celsius. Ju lägre U-värdet är desto bättre isolerförmåga.

$$U = \frac{1}{R} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (\text{Ekvation 1})$$

$$R = \text{värmemotstånd} \left[\frac{m^2K}{W} \right]$$

2.1.2 Värmekonduktivitet, λ

Enligt Sandin (2010) är värmekonduktivitet, som även kallas λ -värde, lambda-värde, den värmemängd som passerar varje sekund genom en m^2 och en meter tjockt material med en temperaturskillnad på en grad. Ju lägre λ -värde desto bättre isolerförmåga.

$$\lambda = \frac{d}{R} \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (\text{Ekvation 2})$$

$$d = \text{materiallets tjocklek} [m]$$

$$R = \text{värmemotstånd} \left[\frac{m^2K}{W} \right]$$

2.1.3 Värmemotstånd, R

Sandin (2010) skriver att värmemotstånd är ett motstånd mot värmetransport. Vid beräkning av U-värde ska även hänsyn tas till övergångsmotstånd på insidan (R_{si}) och utsidan (R_{se}).

$$R = \frac{d}{\lambda} \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad (\text{Ekvation 3})$$

2.1.4 Densitet, ρ

Enligt Burström (2007) är densitet ett förhållande mellan massa och volym och har beteckningen ρ med enheten kg/m^3 .

2.1.5 Specifik värmekapacitet, c

Burström (2007) skriver att specifik värmekapacitet är den värmemängd som behövs för att höja temperaturen hos en kropp med en grad Celsius per kilogram. Specifik värmekapacitet har beteckningen c och enheten $\text{J}/(\text{kgK})$.

2.1.6 Värmeflöde, P

Burström (2007) menar att på grund av att det är temperaturskillnader mellan väggar och rum sker en viss värmetransport som kallas värmeflöde. Värmeflöde betecknas med P och har enheten W som är lika med J/s . värmeflödet sker på tre olika sätt, strålning, konvektion och ledning.

2.1.7 Värmeövergångskoefficient, α

Enligt SS-EN 1264-2:2008+A1:2012 är värmeövergångskoefficienten hur värme övergår från golv till luften i rummet. Beräkning sker enligt ekvation 4.

$$q = 8,92(T_g - T_i)^{1,1} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (\text{Ekvation 4})$$

$T_g = \text{Temperatur på golvytan } [^\circ\text{C}]$

$T_i = \text{Temperatur i rummet } [^\circ\text{C}]$

2.1.8 Dimensionerande vinterutetemperatur, $DVUT$

Dimensionerande vinterutetemperatur, DVUT, är den temperatur som används vid beräkning av effektbehov för byggnader. DVUT är ortspecifik och har en tidskonstant som väljs efter byggnadens effektbehov och värmekapacitet Boverket (2012). I Gävle är DVUT för ett dygn $-17,2 \text{ }^\circ\text{C}$ enligt Boverket & SMHI (2017).

2.2 Byggnadstekniska problem

2.2.1 Tjäle

Plast- & kemiföretagen (2010) som är en branschorganisation för cellplasttillverkare i Sverige menar att problematik kring tjällyftning hos byggnader förekommer. Om det finns vatten i marken som riskerar att frysa till is riskeras tjällyftning på grund av att is upptar större volym än vatten i flytande form. Således skapas ett vertikalt tryck uppåt som kan skada markplattan och leda till bristningar. Detta fenomen ter sig speciellt vid så kallad tjälfarlig mark som till exempel silt, siltig morän och grovlera. Plast- & kemiföretagen (2010) hänvisar till EN ISO 13793:2001 vad gäller tjälskydd vid platta på mark. De menar även att det finns tre alternativ till att lösa tjälskyddet:

- Låta grundläggningsdjupet vara lägre än tjäldjupet
- Schakta bort tjälfarlig mark
- Använda markskivor som tjälskydd

2.2.2 Köldbryggor

Typiskt finns det två sorters köldbryggor. Den ena typen utgörs av återkommande byggnadselement såsom bjälklag och den andra består av kopplingar/knutpunkter där olika delar i klimatskärmen förbinder sig till varandra, exempelvis golv till vägg och vägg till tak. Vanligtvis tas hänsyn till termisk påverkan av köldbryggor genom gränsvärden för hur stora transmissionsförlusterna får vara i de förekommande fallen genom bland annat europeiska standarden EN ISO 14683 (Ge & Baba, 2015).

Larbi (2005) menar att multidimensionella värmeflöden uppkommer i köldbryggorna och att ju bättre en byggnad är isolerad desto större andel av den totala värmeförlusten hos byggnaden är orsakad av köldbryggor. Capozzoli, Gorrino, & Corrado (2013) menar dock att de multidimensionella värmeflödena inte påverkas av tilläggsisoleringen och att bättre resultat uppnås genom kvantitativa utvärderingar utifrån bestämda linjära värmeflöden hos tvådimensionella modeller. De hävdar dock att tilläggsisolera är det bästa sättet att motverka endimensionella värmeflöden.

2.2.3 Termisk komfort

Byggnader ska utformas så termisk komfort anpassas till byggnadens ändamål och ska erhållas under normal användning. När det gäller golv i byggnader ska ytemperaturen på golvet vara högst 26°C och som lägst 16°C. I hygienutrymmen ska temperaturen vara lägst 18°C och i rum avsedda för barn ska lägsta temperaturen vara 20°C.

Detta betyder att ytttemperaturskillnaden, ΔT , på ett golv i en villa högst får vara 6°C (Boverket, 2017).

Enligt BETSI-undersökningen som Boverket (2009) genomfört är medeltemperaturen i småhus $21,2 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ vilket legat till grund för modellens innetemperatur.

För att uppfylla kraven för termisk komfort måste ett styr- och reglersystem användas i samband med golvvärme. Styr- och reglersystemet anpassar värmemängden i slingplanet så att rätt temperatur uppnås inomhus när utetemperaturen varierar.

En givare känner av utetemperaturen och skickar den informationen till styrventilen som öppnar och stänger värmeflödet efter behov (Energirådgivningen, 2018b).

2.3 Varierande temperaturer

2.3.1 Utetemperatur

För att kunna utföra simuleringar med varierande utetemperatur sattes den till en funktion. Gävles årsmedeltemperatur är enligt Statistiska centralbyrån (SCB, 2011) $5,2^{\circ}\text{C}$. Gävles lägsta månadsmedeltemperatur är $-4,8^{\circ}\text{C}$ vilket medför att temperaturdifferensen mellan dessa är 10°C .

$$5,2 - (-4,8) = \Delta T = 10^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ekvation 5})$$

$\Delta T = \text{Temperaturdifferens}$

I Gävle är den varmaste månadsmedeltemperaturen $16,3^{\circ}\text{C}$. Skillnaden mellan denna och årsmedeltemperaturen ($5,2^{\circ}\text{C}$) är $11,3^{\circ}\text{C}$ men detta avrundas till 10 då det inte påverkar resultaten märkbart (SCB, 2011).

$$\text{Varierande utetemperatur} = (T_0 + \Delta T * \sin\left(2 * \frac{\pi}{365 * t}\right)) \quad (\text{Ekvation 6})$$

$t = \text{Tid}$

$T_0 = \text{Årsmedeltemperatur}$

2.3.2 Golvvärmetemperatur

I och med att utetemperaturen varierar över året har byggnaden olika värmebehov för att uppnå termisk komfort. Det betyder att golvvärmetemperaturen behöver variera i samband med utetemperaturen, vilket korrigeras med hjälp av DVUT och byggnadens balanstemperatur.

3 Metod

Under de senaste årtiondena olika metoder använts för att analysera jordvärmeöverföring. Exempel på olika metoder är analytisk, fältmätning, värmeförlustfaktor, analytisk kombinerad med numerisk modellering, en-, två- och tredimensionella numeriska simuleringar. Även om det finns många metoder och undersökningar som har gjorts inom området är ändå jordvärmeöverföring en av dem svåraste aspekterna inom byggnadsanalys på grund av att många faktorer spelar in. Alla metoderna har olika för- och nackdelar. Exempelvis kan 3-D simuleringar genomföras med komplexa geometrier men själva simuleringarna kan ta lång tid. Analytisk beräkning ger ett bra och snabbt svar men uträkningarna genomförs med förenklade konstruktioner. Fältmätningar kräver en fysisk byggnad där mätningar kan genomföras och om olika typer av klimat ska inkluderas krävs mätningar under lång tid (Chen, 2014).

(Gerlich, Sulovská, & Zálešák, 2013) skriver att det finns en tendens att reducera energiförbrukningen hos en byggnad om en numerisk undersökning utförts i projekteringsstadiet. För att minimera felkällorna bör resultaten valideras. De tre olika testerna som rekommenderas för att jämföra resultaten från den numeriska modellen är:

- Analytisk verifiering
- Jämföra med andra modeller
- Bekräfta med experimentella resultat.

3.1 Simulering

Enligt Svensk standard (SS-EN ISO 13370:2017) finns det tre olika metoder för att undersöka värmeöverföring via marken.

- Tredimensionell numerisk undersökning
- Tvådimensionell numerisk undersökning
- Numerisk beräkning

3.1.1 COMSOL

COMSOL är ett multifysiskt simuleringsprogram som kan kombinera många fysiska fenomen som ofta framkommer från separata partiella differentialekvationer inom teknik och fysik samt från standardiserade approximationer som implementeras i programmet. Ekvationerna har inbyggda gränssnitt för att få möjlighet till ekvationerna som används. Modellering i COMSOL kan leda till utmärkta resultat men det krävs en viss kunskap hos användaren för att undvika enklare fel. (Dickinson, Ekström, & Fontes, 2014).

I COMSOL är det möjligt att dela in modellen i finita element, vilket betyder att materialet bryts ned i mindre komponenter och förutsättningar antas vara stationära mellan dessa för att förenkla de numeriska beräkningarna. Genom denna metod där materialet är indelat i ett nätverk av punkter med sin egen information, kan hänsyn tas till värmetrögheten i konstruktionen. Detta tack vare att temperaturen i punkterna beror på värmetröghet och värmeledningsförmåga i materialen (Mao & Johansson, 1997).

Metoden som valts är tvådimensionell numerisk undersökning med finita elementmetoden i programmet COMSOL. Valet av simuleringsprogram grundar sig i en viss bekantskap som byggts upp under studietiden på Högskolan i Gävle samt att det är globalt erkänt och används av bland annat KTH, Stanford, MIT och rymdflygstyrelsen Nasa (Rosén, 2009).

4 Process och resultat

Under detta kapitel presenteras hur undersökningen genomförts och de uppnådda resultaten.

4.1 Process

Här presenteras övergripande hur undersökningen genomförts.

- Dimensionerande slingtemperatur bestäms med DVUT, för att golvvärmesystemet ska leverera 50 W/m^2 uppåt. Det är beroende av golvmaterial och CC-mått hos golvvärmeslingan. Stationär beräkning.
- Sambandet mellan varierande utetemperatur och varierande golvvärmetemperatur.
- För ett helt år summeras värmeförluster genom kantbalk respektive själva plattan.

4.1.4 Simulering

En referensmodell skapades i simuleringsprogrammet COMSOL Multiphysics som vidare arbete utgick ifrån. Modellen är 2-dimensionell och framtagandet av modellen började med att skapa geometrier där första geometrin var platta-på-mark [1]. Sedan skapades en kantbalk [2], ett L-element [3], grundisolering [4], omkringliggande mark [5], syll [6], vägg [7], golvvärmeslingor [8] samt tjälisolering [9]. Figur 6 visar modellens uppbyggnad.

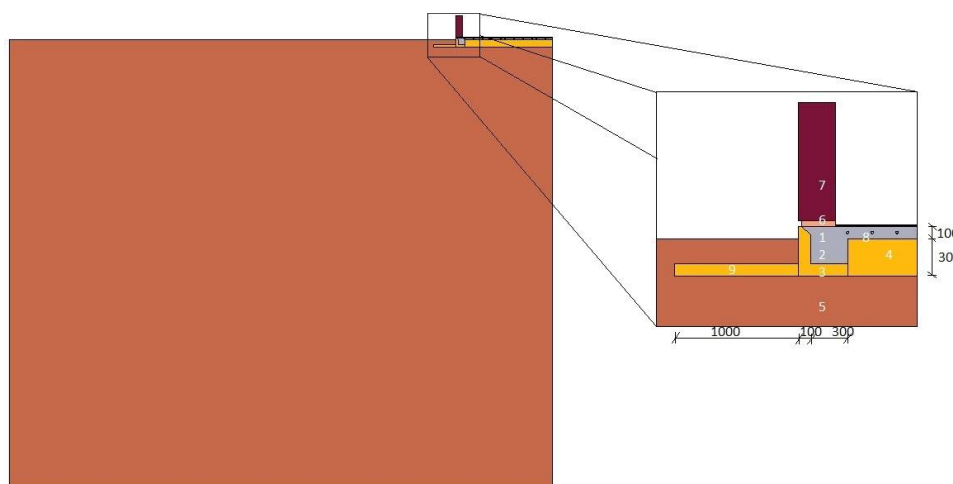


Fig. 6. Referensmodellens uppbyggnad.

Geometrierna behandlades av inmatade parametrar som programmerats manuellt för att kunna ändra förhållanden mellan de fysiska förutsättningarna i modellen. Den horisontella och vertikala avskärningen av modellen gjordes i enlighet med SS-EN ISO 10211:2017. Sammanställning av parametrarna finns i Bilaga B.

När geometrierna var skapade tillsattes dess materialparametrar i enlighet med Burström, P.G. (2007). Markens värmekonduktivitet (λ -värde) användes i COMSOL i enlighet med SS-EN ISO 13370:2017 för okända markförhållanden. Se Tab. 2 och tillhörande Fig. 7.

Tab. 2. Materialparametrar.

	Värmekonduktivitet (W/mK)	Densitet (kg/m ³)	Specifik värmekapacitet (J/kgK)	Färgkod
Betong	1,7	2300	1000	
Cellplast	0,04	30	1450	
Trä	0,14	500	1600	
Mark	2	2000	1000	
Vägg	0,046	87	1073	
Golvmaterial				
Träparkett	0,12	600	500	
Klinker	1	2300	1000	

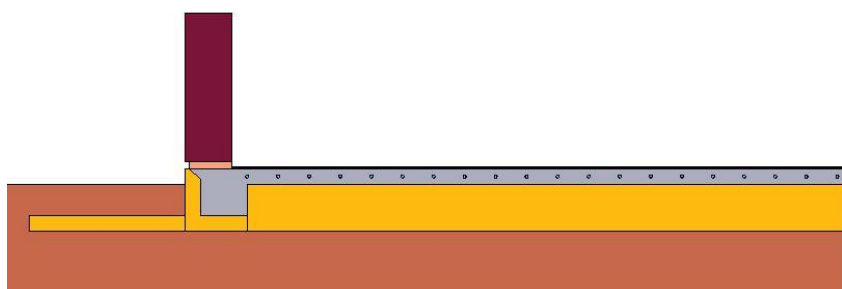


Fig. 7. Komplement till Tab. 2 angående färgkoder.

Utifrån referensmodellen skapades fyra modeller med två olika golvmaterial (parkett och klinker) och två olika CC-mått (200mm och 300mm) på golvvärmslingorna i enlighet med Fig. 8.

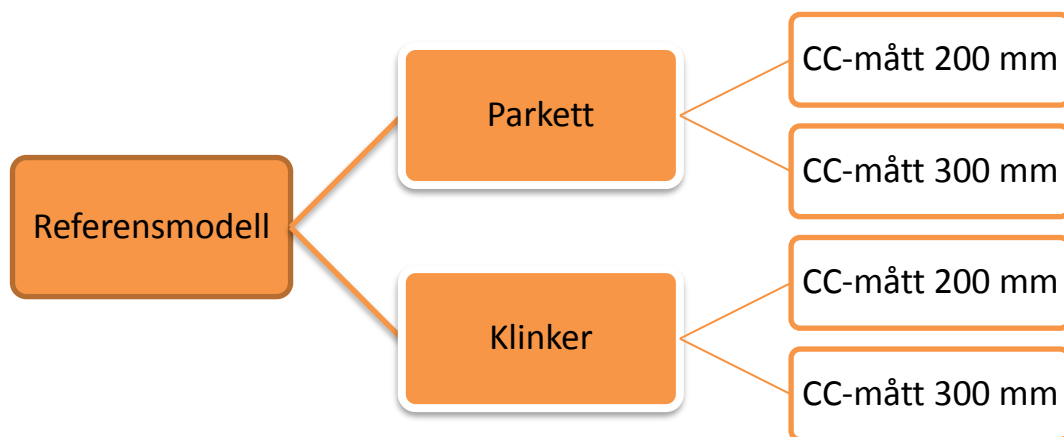


Fig. 8. Illustration över modellernas förhållande till varandra.

För att undersöka vilken vattentemperatur slingplanet behövde för att leverera 50 W/m^2 med en accepterad differens på $\pm 1 \%$ genom golvmaterialet, genomfördes stationära simuleringar av de olika modellerna där utetemperaturen sattes till DVUT för en dag i Gävle. Eftersom värmebehovet var känt, men inte vilken vattentemperatur som behövdes, bestämdes denna temperatur genom att i två beräkningar skatta en lägre och en högre temperatur, vilka ger en lägre och en högre effekt än 50 W/m^2 , för att sedan interpolera en vattentemperatur som ger $50 \text{ W/m}^2 \pm 1 \%$.

Denna temperatur ligger till grund för slingtemperaturerna i de dynamiska beräkningarna.

Utetemperaturen programmerades till en variabel temperatur som varierar över året, enligt ekvation 6.

Temperaturen på golvvärmen varierar med utetemperaturen om medelutetemperaturen är lägre än $13 \text{ }^\circ\text{C}$ (vilket är byggnadens balanstemperatur). När medelutetemperaturen överstiger $13 \text{ }^\circ\text{C}$ ska golvvärmetemperaturen sättas till det statiska värdet $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Vattentemperaturen hos golvvärmen är känd inom intervallet för utetemperaturen $-17,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (DVUT) till $13 \text{ }^\circ\text{C}$. En linjär funktion kan således beräknas genom lutningen mellan dessa två värden. Denna funktion används som temperatur på golvvärmen i förhållande till utetemperaturen. De olika modellerna har olika förutsättningar och därmed även olika funktioner på golvvärmetemperaturen.

När utetemperaturen och golvvärmetemperaturen var varsin variabel funktion genomfördes dynamiska simuleringar på alla fyra modeller.

När dimensionerande slingtemperaturen bestämts kunde utetemperaturskurvorna modelleras. Därmed kunde dynamiska beräkningarna genomföras.

Fig. 9 och 10 visar var summeringen av värmeförluster skedde i modellen. Värmeförluster består av den värmeövergång som sker från konstruktionens insida till utsida. Därmed bortsågs värmeövergången i motsatt riktning (gratisenergi) ur resultatet.

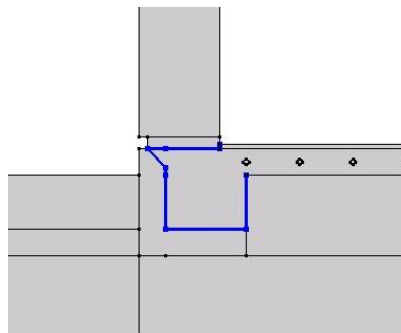


Fig. 9. Kantbalksförlusternas uppmätninglinje (blå).

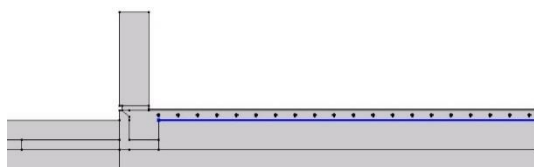


Fig. 10. Uppmätninglinje för förluster under platta på mark (blå).

Nya dynamiska simuleringar genomfördes på följande modeller:

- Parkett, CC 200 mm
- Klinker, CC 300 mm

De ovan nämnda modellerna isolerades sedan på nya sätt enligt:

- Fall 1: 100 mm tilläggsisolering utsida kantbalk, se Fig. 11.
- Fall 2: 100 mm tilläggsisolering utsida + undersida kantbalk, se Fig. 12.
- Fall 3: 100 mm tilläggsisolering insida kantbalk som i kombination med befintligt L-element motsvarar ett U-element. Se Fig. 13.

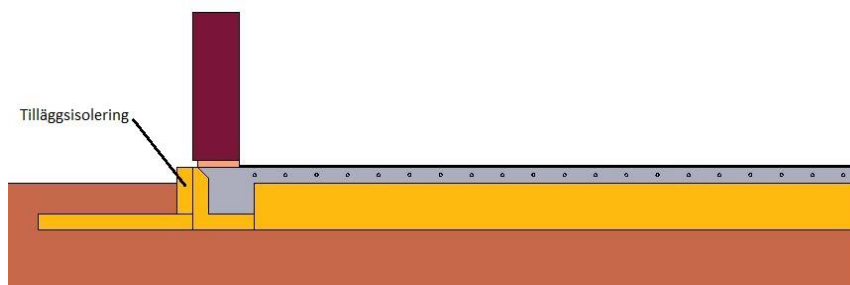


Fig. 11. Tilläggsisoleringen på utsidan av kantbalken. Fall 1.

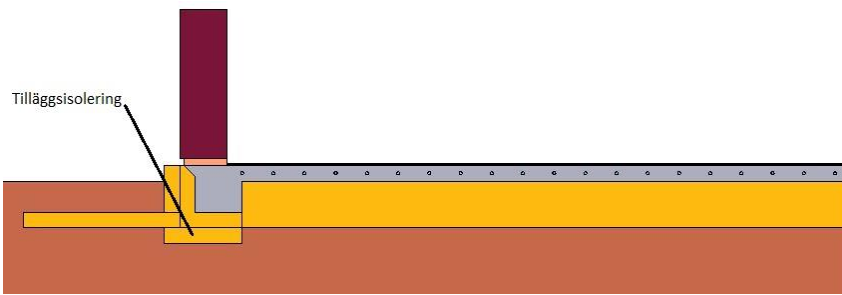


Fig. 12. Tilläggsisoleringen på utsida- och undersida av kantbalken. Fall 2.

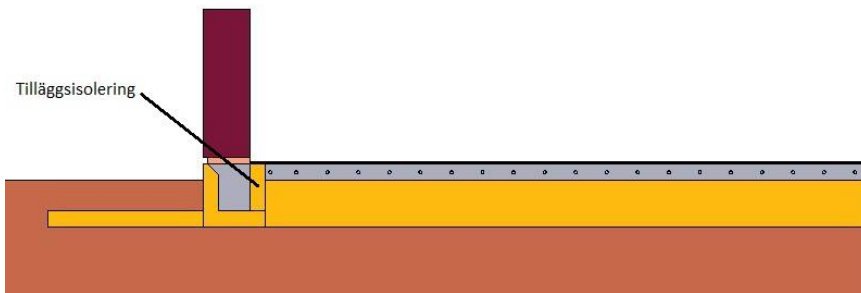


Fig. 13. Tilläggsisolering där kantbalksisoleringen motsvarar ett U-element. Fall 3.

När totalt 10 simuleringar genomförts sammanställdes och analyserades resultaten.

4.2 Resultat

4.2.1 Statiska simuleringar

I Tab. 3 och 4 presenteras resultatet på hur varm golvvärmslingan ska vara för att värmeflödet uppåt ska vara 50 W/m^2 vid golvmaterialet med en accepterad felmarginal på $\pm 1 \%$, under rådande DVUT.

Tab. 3. Temperatur på golvvärmslingan per W/m^2 genom golvytan.

CC-200[mm]	Parkett	Klinker
Temp. Golvvärme	W/m2	W/m2
34,5	50,14	
28,9		49,81

Tab. 4. Temperatur på golvvärmslingan per W/m^2 genom golvytan.

CC-300[mm]	Parkett	Klinker
Temp. Golvvärme	W/m2	W/m2
36,3	49,84	
30,7		50,04

Av resultaten i Tab. 3 och 4 bestämdes en variabeltemperatur hos golvvärmslingan genom att golvvärmetemperaturen är känd vid DVUT ($-17,2 \text{ }^\circ\text{C}$) och $13 \text{ }^\circ\text{C}$, där värmeflödet uppåt är 50 W/m^2 .

Det linjära sambandet mellan värdena erhöles en funktion av hur golvvärmetemperaturen varierar, med hjälp av linjär interpolation. Se Tab. 5 och 6.

Tab. 5. Funktion på golvvärmetemperaturen beroende av utetemperaturen.

CC-mått 200[mm]	14mm parkett	CC-mått 200[mm]	7mm klinker
	Golvvärmetemp.		Golvvärmetemp.
Utetemp. [$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]	Utetemp. [$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]
-17,2	34,5	-17,2	28,9
13	21	13	21
$-0,4470 \cdot T_{\text{ute}} + 26,811$		$-0,2616 \cdot T_{\text{ute}} + 24,401$	

Tab. 6. Funktion på golvvärmetemperaturen beroende av utetemperaturen.

CC-mått 300[mm]	14mm parkett	CC-mått 300[mm]	7mm klinker
	Golvvärmtemp. [°C]		Golvvärmtemp. [°C]
Uttemp. [°C]		Uttemp. [°C]	
-17,2	36,3	-17,2	30,7
13	21	13	21
$-0,5066 * T_{ute} + 27,586$		$-0,3212 * T_{ute} + 25,175$	

Hur golvvärmetemperaturen förhåller sig till utetemperaturen presenteras i Fig. 14.

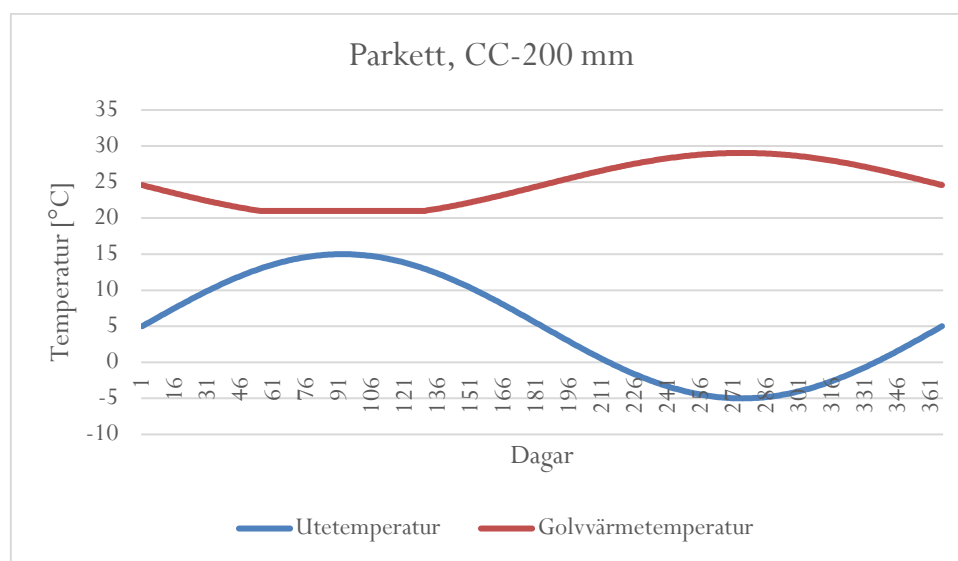


Fig. 14. Förhållandet mellan utetemperatur och golvvärmetemperatur.

4.2.2 Dynamiska simuleringar

Resultaten av hur stora förluster som sker i kantbalken respektive markkonstruktionsförluster, i förhållande till golvmaterial och CC-mått hos golvvärmslingan, presenteras i Tab. 7.

Tab. 7. Sammanställning av förluster genom kantbalk och markkonstruktionsförluster.

	Parkett	Parkett	Klinker	Klinker
CC-mått [mm]	200	300	200	300
Kantbalksförlust [kWh/m]	41,87	37,59	36,74	33,75
Platta på mark-förluster [kWh/m]	40,67	41,23	35,71	36,29
Markkonstruktionsförluster [kWh/m]	82,54	78,82	72,45	70,04
$\frac{\text{Kantbalksförluster}}{\text{Markkonstruktionsförluster}} = [\%]$	50,73	47,69	50,71	48,19

4.2.3 Tilläggsisolering

Här presenteras resultaten av tilläggsisolering. Se Fig. 11, 12 och 13 där utformning av tilläggsisoleringen illustreras.

- Fall 1: 100 mm tilläggsisolering utsida kantbalk.
- Fall 2: 100 mm tilläggsisolering utsida + undersida kantbalk.
- Fall 3: 100 mm tilläggsisolering insida kantbalk som i kombination med befintligt L-element motsvarar ett U-element.

4.2.3.1 Tilläggsisolering, klinker

I Tab. 8 redovisas resultaten av tilläggsisolering av tidigare modell med klinker som golvmaterial och CC-mått 300 mellan golvvärmslingorna.

Tab. 8. Sammanställning av kantbalksförluster och markkonstruktionsförluster efter tilläggsisolering.

Isolering enligt:	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Kantbalksförlust [kWh/m]	31,20	29,81	19,77
Platta på mark-förluster [kWh/m]	35,80	36,00	36,92
Markkonstruktionsförluster [kWh/m]	67,00	65,81	56,69
$\frac{\text{Kantbalksförluster}}{\text{Markkonstruktionsförluster}} = [\%]$	46,57	45,30	34,87

4.2.3.2 Tilläggsisolering, Parkett

I Tab. 9 redovisas resultaten av tilläggsisolering av tidigare modell med parkett som golvmaterial och CC-mått 200 mellan golvvärmslingorna.

Tab. 9. Sammanställning av kantbalksförluster och markkonstruktionsförluster efter tilläggsisolering.

Isolering enligt:	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Kantbalksförlust [kWh/m]	37,81	37,05	17,68
Platta på mark-förluster [kWh/m]	39,41	40,50	42,35
Markkonstruktionsförluster [kWh/m]	77,22	77,55	60,03
$\frac{\text{Kantbalksförluster}}{\text{Markkonstruktionsförluster}} = [\%]$	48,96	47,78	29,45

4.2.3.3 Sammanställning av resultat vid tilläggsisolering

I Fig. 15 visas procentuella kantbalksförluster innan- och efter tilläggsisolering.

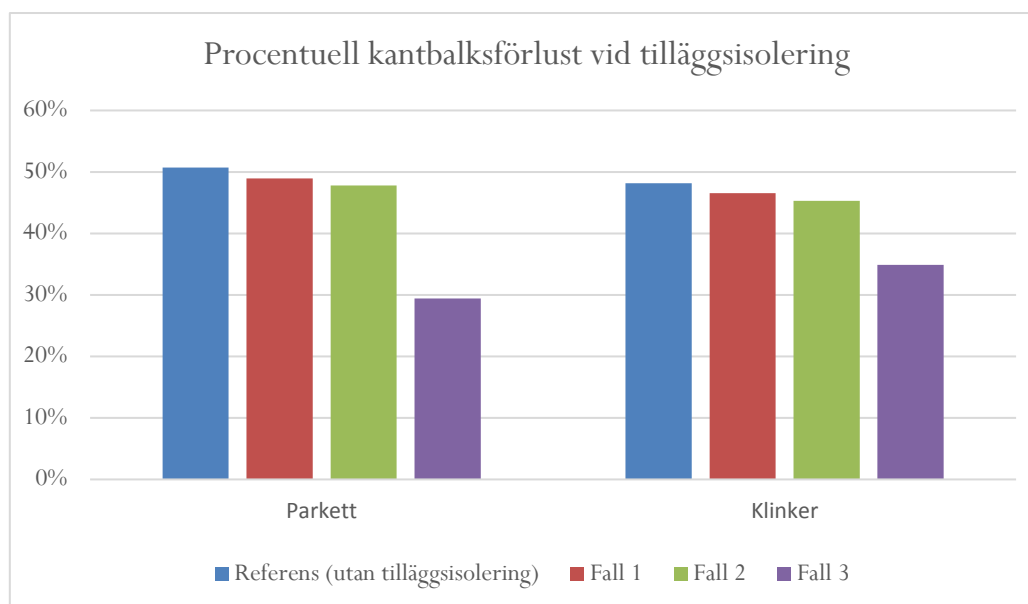


Fig. 15. Skillnad i kantbalksförluster efter tilläggsisolering.

5 Analys & Diskussion

5.1 Analys

Modellen med klinker som golvmaterial har lägre värmeförluster än modellen med parkett, oavsett CC-mått. De procentuella kantbalksförlusterna mot de totala förlusterna är tämligen lika i alla modeller.

Hos båda konstruktionerna råder sambandet att CC-mått 300mm leder till lägre procentuella kantbalksförluster än CC-mått 200mm. I Fig. 16 visas hur stora de procentuella kantbalksförlusterna är i förhållande till värmemotståndet, R , på golvmaterialet i enlighet med Ekv. 3.

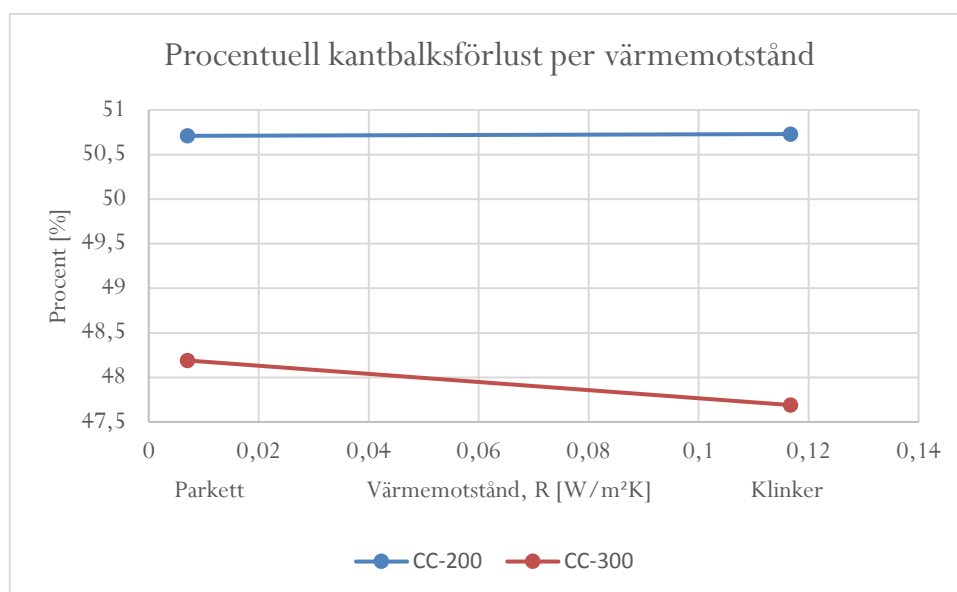


Fig. 16. Procentuell kantbalksförlust per värmemotstånd hos golvmaterialet. Förtydligande: Punkterna från vänster till höger motsvarar parkett samt klinker i undersökningens modeller.

5.2 Diskussion

Modellerna är uppbyggda med hänseende på hur en kantbalksutförning kan se ut i praktiken. Tjälisolering valdes att ha i modellen för att vi använde oss av 300 mm isolering under platta på mark, vilket medför att relativt små värmeförluster sker i nedåtgående riktning. I praktiken hade det kunnat leda till tjällyft i marken som skadar konstruktionen och med det i åtanke valdes att placera tjälisolering i modellen för att få mer realistiska resultat. Tjälisoleringen ligger egentligen med en svag lutning ut från byggnaden för att leda bort vatten men i undersökningen har den lagts rakt ut i förenklande syfte, då detta inte påverkar resultaten i stort.

I modellen finns en syll som har materialparametrar i enlighet med trä. Denna ligger helt öppet i modellen vilket den inte gör i praktiken. Detta påverkar resultatet men bedömningen gjordes att den borde finnas där eftersom syllen har en sämre isolerande förmåga än resterande delen av väggen och agerar köldbrygga i kontakt med platta på mark.

Vi valde att göra simuleringar istället för mätningar på en befintlig byggnad för att ta hänsyn till Sveriges dynamiska klimat med hjälp av månadsmedeltemperaturer. Vid mätningar hade inte detta varit möjligt då arbetet omfattar 10 veckor och klimatet under en så kort period är relativt konstant. Dock har vi i arbetet diskuterat förfarandet och resultaten och kommit fram till att en validering av simuleringen jämfört med mätvärden, skulle gynna undersökningen. Ett alternativ skulle kunna vara att ta fram mätvärden hos en befintlig byggnad under arbetets gång.

COMSOL som simuleringsprogram valdes för att grundläggande kunskaper redan erhöles i programmet sedan tidigare och det ansågs passa undersökningen bra. För att underlätta arbetet i kommande undersökningar rekommenderas att ha goda eller väldigt goda kunskaper i programmet. Detta för att kunna göra fler undersökningar och jämföra dess resultat med varandra för att uppnå goda resultat. Simuleringarna som genomförts i COMSOL består av många steg vilket medför en risk för att ett eller flera mindre fel kan ske utan att upptäckas.

Resultaten i undersökningen baseras på att samma temperatur i golvvärmslingen används vid simulering med och utan tilläggsisolering. Detta kan vara en felkälla då tilläggsisoleringen sänker värmeförlusterna och temperaturen hos golvvärmslingen kan sänkas något för att upprätthålla samma effekt genom golvmaterialen. En fördel med förfarandet är att det blir tydligt hur mycket värmeenergi som besparas i modellen genom att tilläggsisoleringen installeras. En nackdel är att det endast visar värmeförlusterna och inte energibesparingen som sker genom temperatursänkningen hos golvvärmslingen.

Resultaten behandlar endast mätdata för de dagar värmeövergången sker från insida till utsida, genom modellens konstruktion (byggnaden). Således påverkar detta uppvärmningssäsongens antal dagar. Resultaten påverkades negativt under *tilläggsisolering Parkett - Fall 2* då denna simulering hade större markkonstruktionsförluster än *Fall 1*, trots att konstruktionen var mer värmeisolerad.

Tilläggsisolering av kantbalken ger en liten förändring av värmeförlusterna. Det som ger bäst resultat i denna undersökning är att byta ut L-elementet till ett U-element för att separera kantbalken från markplattan.

När golvvärme används i praktiken skapas en temperatursänkning över slingans längd eftersom värme avges från golvvärmen. Det bortsågs från i denna undersökning för att modelleringen inte skedde på ett faktiskt objekt och slinglängden är svår att förutse. Detta kan komma att påverka resultatet.

Utformningen på byggnader som byggs i nuläget är att väggsockeln inte går ut lika långt som fasadskiktet. Om tilläggsisolering tillämpas på utsidan av kantbalken kan det medföra att sockeln kommer ut längre än fasadskiktet på väggen, vilket kan anses lite banbrytande i dagsläget.

Kantbalkens roll som köldbrygga blir allt mindre desto större byggnadens area, vilket gör att kantbalken får en större roll i mindre byggnader än större byggnader.

6 Slutsatser

Kantbalksförlusterna står för ca 50 % av markkonstruktionsförlusterna i modellen utan tilläggsisolering av befintligt L-element.

Vid tilläggsisolering kan kantbalksförlusterna sänkas några procent men om man istället byter från L-element till U-element går det att sänka förlusterna till ca 30 % enligt utförda simuleringar.

Eftersom det är många varierande parametrar och modellens uppbyggnad är något förenklad, kan resultaten variera jämfört med andra undersökningar. Resultaten anses ändå visa ett samband mellan hur stora kantbalksförlusterna är mot markkonstruktionsförlusterna. Således har undersökningens mål att upplysa kantbalkens värmeförluster uppnåtts.

Till framtida studier kan en livscykelkostnadsanalys (LCC) genomföras för att ta reda på hur lång återbetalningstiden är för tilläggsisoleringen och att jämföra modellen med faktiska mätvärden för byggnader. En annan sak att undersöka är hur fuktrelaterade problem påverkar konstruktionens termiska egenskaper i praktiken.

Hur mycket kan man sänka förlusterna i kantbalken? Kan man acceptera en viss värmeförlust?

Referenser

- Boverket (2009). *Så mår våra hus [elektronisk resurs]: redovisning av regeringsuppdrag beträffande byggnaders tekniska utformning m.m.* (1. uppl.) Karlskrona: Boverket.
- Boverket (2012). *Handbok för energihushållning enligt boverkets byggregler.* (2. Uppl.). Karlskrona: Boverket. Från <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2012/handbok-for-energi-hushallning-enligt-boverkets-byggregler.pdf>
- Boverket. (2002). *Grundtips för golvvärme: isolering & fönster golvmaterial inomhus temperatur* [Broschyr]. Stockholm: EO Print. Från https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2002/grundtips_for_golvvarme.pdf
- Boverket. (2017). *Boverkets byggregler: föreskrifter och allmänna råd. (Konsoliderad version av BBR)* Stockholm: Svensk Byggtjänst. Från https://www.boverket.se/contentassets/a9a584aa0e564c8998d079d752f6b76d/konsoliderad_bbr_bfs_2011-6.pdf
- Boverket & SMHI. (2017). *Öppna data - Dimensionerande vinterutetemperatur (DVUT 1981–2010) för 310 orter i Sverige.* Hämtad 16 maj, 2018, från Boverket, <https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/oppna-data/dimensionerande-vinterutetemperatur-dvut-1981-2010/>
- Burström, P.G. (2007). *Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper.* (2. uppl.) Lund: Studentlitteratur.
- Capozzoli, A., Gorrino, A., & Corrado, V. (2013). *A building thermal bridges sensitivity analysis.* Applied Energy, 107, 229–243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.045>
- Chen, D. (2014). *Unified solutions for steady-state ground-coupled heat transfer.* Energy and Buildings, 68, 444–459. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.04.029>
- Dickinson, E. J. F., Ekström, H., & Fontes, E. (2014). *COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review.* Electrochemistry Communications, 40, 71–74. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2013.12.020>
- Energimyndigheten. (2006). *Villavärmepumpar: Energimyndighetens sammanställning av värmepumpar för småhus* [Broschyr]. Västerås: Edita Västra Aros. Från <https://skvp.se/download/285-482BC77C5DB22E6B5646D2D845F2F3EF/villavarmepumpar.pdf>
- Energimyndigheten. (2017). *Energiläget 2017.* (ET 2017:12). Bromma: Arkitektkopia AB. Från <https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=5693>

- Energirådgivningen. (2018a). *Värmepump*. Hämtad 23 april, 2018, från Energirådgivningen, <https://energiradgivningen.se/lagenhet/varmepump>
- Energirådgivningen. (2018b). *Distributionssystem*. Hämtad 16 maj, 2018, från Energirådgivningen, <https://energiradgivningen.se/smahus/distributionssystem>
- Förenta Nationerna (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Hämtad 19 april, 2018, från Förenta Nationerna, <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
- Ge, H., & Baba, F. (2015). *Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building*. *Energy and Buildings*, 105, 106–118. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.07.023>
- Gerlich, V., Sulovská, K., & Zálešák, M. (2013). *COMSOL Multiphysics validation as simulation software for heat transfer calculation in buildings: Building simulation software validation*. *Measurement*, 46(6), 2003–2012. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2013.02.020>
- Larbi, A. Ben. (2005). *Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings*. *Energy and Buildings*, 37(9), 945–951. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.013>
- Mao, G., & Johannesson, G. (1997). *Dynamic calculation of thermal bridges*. *Energy and Buildings*, 26(3), 233–240. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00005-4)
- Plast- & kemiföretagen. (2010). *EPS i grund och mark*. [Broschyr]([2. uppl.]). Stockholm: Plast- och kemiföretagen. http://www.sundolitt.se/upload_images/5B1CE0E5FD784AC4A90615C4948CB7FA.pdf
- Rosén, S. (2011). *Extraknäck blev snabbväxande programvaruföretag*. Hämtad 15 maj, 2018, från <https://web.archive.org/web/20160307023629/https://www.kth.se/itm/inst/indek/avdelningar/2.2313/forskning/foretagsexempel/comsol-1.268314>
- Sandin, K. (2010). *Praktisk byggnadsfysik*. (1. uppl.) Lund: Studentlitteratur.
- Svensk standard, (2012). *SS-EN 1264–2:2008+A1:2012. Vattenburet system för uppvärmning och kylning: Del 2: Golvvärme: Bestämning av värmeavgivning med användning av beräkningar respektive provningsmetoder*. Stockholm: SIS förlag.
- Svensk standard, (2017). *SS-EN ISO 13370:2017. Byggnaders termiska egenskaper: Värmeöverföring via Marken*. (3. uppl.). Stockholm: SIS förlag.
- Svensk standard, (2017). *SS-EN ISO 10211:2017. Köldbryggor i byggnadskonstruktioner: Värmeflöden och yttemperaturer: Detaljerade beräkningar*. Stockholm: SIS förlag.

Statistiska centralbyrån (2011). *Statistisk årsbok för Sverige 2011 [Elektronisk resurs]* = *Statistical yearbook of Sweden 2011*. Stockholm: Statistiska centralbyrån.

TräGuiden. (2003). *Platta på mark*. Hämtad 15 maj, 2018, från TräGuiden, <https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktiv-utformning/grundlaggning/grundlaggning/platta-pa-mark/?previousState=>

Bilaga A - Litteratursökning

Sökord	Databas/sökmotor	Antal träffar (vald artikels position)	Artikelnamn
“Slab on ground”	ScienceDirect	469 (25)	“Unified solutions for steady-state ground-coupled heat transfer”
Dynamic “thermal bridges”	ScienceDirect	1231 (5)	“Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building”
“Thermal bridge” simulation	ScienceDirect	1636 (48)	“Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings”
“slab on ground” COMSOL	ScienceDirect	2 (1)	“COMSOL Multiphysics validation as simulation software for heat transfer calculation in buildings: Building simulation software validation”
“COMSOL Multiphysics”	ScienceDirect	8477 (11)	“COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review.”
“Thermal bridges” dynamic	ScienceDirect	1231 (22)	“Dynamic calculation of thermal bridges”
“Thermal bridge” “slab on ground”	ScienceDirect	48 (1)	“A building thermal bridges sensitivity analysis”

Bilaga B – Parametrar i COMSOL

Beteckning	Namn	Värde	Enhet
Ti	Temperatur inne	21	°C
Te	Temperatur ute (DVUT)	-17,2	°C
Tg	Temperatur golvvärme	21-36,3	°C
Rsi	Värmemotstånd	0,13	m ² K/W
Rse	Värmemotstånd	0,04	m ² K/W
Hmarkplatta	Höjd markplatta	100	mm
Wmarkplatta	Bredd markplatta	4+Wvägg- Wsidisolering	mm
Hkantbalk	Höjd kantbalk	200	mm
Wkantbalk	Bredd kantbalk	300	mm
Hcellplast	Höjd cellplast	300	mm
Wcellplast	Bredd cellplast	Wmarkplatta-Wkantbalk	mm
Hkantbalkiso	Höjd cellplast under kantbalk	100	mm
Wkantbalkiso	Bredd cellplast under kantbalk	Wkantbalk	mm
Hsidcellplast	Höjd cellplast på sidan av kantbalk	Hkantbalk+Hkantbalkiso	mm
Wsidcellplast	Bredd cellplast på sidan av kantbalk	100	mm
Wvägg	Bredd vägg	300	mm
Hvägg	Höjd vägg	1-Hsyll	mm
Hgolvmaterial	Höjd golvmaterial	0,007/0,014	mm
Wmark	Bredd mark	20000	mm
Hmark	Höjd mark	19700	mm
Welement	Bredd L-element	100	mm
Hsyll	Höjd syll	45	mm
Wtilläggsisolering	Bredd tilläggsisolering	100	mm
Wgolvvärme	CC-mått golvvärme	200/300	mm
Hgolvvärme	Golvvärmens radie	10	mm

